



ANA CLARA MUNIZ GARCIA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
PARALELA ÀS FIBRAS DA MADEIRA DE *Eucalyptus spp.*
SOB ELEVADA TEMPERATURA E DIFERENTES TEMPOS
DE EXPOSIÇÃO**

**LAVRAS – MG
2022**

ANA CLARA MUNIZ GARCIA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS DA
MADEIRA DE *Eucalyptus spp.* SOB ELEVADA TEMPERATURA E DIFERENTES
TEMPOS DE EXPOSIÇÃO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. André Luiz Zangiacomo
Orientador

**LAVRAS – MG
2022**

ANA CLARA MUNIZ GARCIA

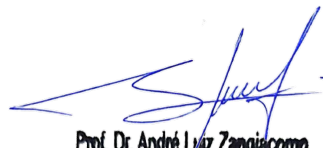
**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS DA
MADEIRA SOB ELEVADA TEMPERATURA E DIFERENTES TEMPOS DE
EXPOSIÇÃO**

**EVALUATION OF THE COMPRESSIVE STRENGTH PARALLEL TO THE
Eucalyptus spp. WOOD FIBERS UNDER HIGH TEMPERATURE AND DIFFERENT
EXPOSURE TIMES**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

12 de setembro de 2022.

Prof. Dr. André Luiz Zangiacomo UFLA
Prof. Dr. Rodrigo Allan Pereira UFLA
Prof. Dr. Igor Jose Mendes Lemes UFLA



Prof. Dr. André Luiz Zangiacomo
Engenharia de Estrutura
DEG / UFLA

**LAVRAS – MG
2022**

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Lavras pelo Ensino Público e de grandíssima qualidade que me proporcionou.

Agradeço ao meu orientador André Zangiacomo pela atenção, paciência e incentivo.

Agradeço ao Professor Paulo Trugilho e à Danielle Gomes Marconato pela solicitude e pelo auxílio durante os ensaios no Laboratório de Biomateriais do Departamento de Ciências Florestais.

Agradeço à minha família, amigas e amigos que sempre me apoiaram com muito amor.

*“Se a educação sozinha não transforma a sociedade, sem ela tampouco a sociedade muda.”
(Paulo Freire)*

RESUMO

Dentre os possíveis motivos para a condição de subutilização da madeira de forma estrutural no Brasil está a insegurança quanto à resistência da madeira quando exposta a altas temperaturas. Este trabalho visa avaliar a variação de resistência à compressão paralela às fibras do Eucalipto (*Eucalyptus spp.*), quando submetido à ação da temperatura, contribuindo para o entendimento da capacidade resistiva de peças estruturais de madeira que foram expostas a um aquecimento e posterior resfriamento em temperatura ambiente. Para isso o aquecimento dos corpos de prova foi realizado dentro de um forno mufla com temperatura interior estimada em 300°C, por três diferentes tempos de exposição. A amostra utilizada é composta por 24 corpos de prova que foram divididos em quatro grupos contendo seis corpos de prova cada: um primeiro grupo foi submetido ao aquecimento em forno mufla por 10 minutos; um segundo grupo foi aquecido por 20 minutos; e um terceiro por 30 minutos. Um quarto grupo não foi submetido à ação da temperatura elevada, sendo considerado o grupo de controle. Verificou-se que tanto o valor da resistência média à compressão paralela às fibras, quanto o valor da densidade média dos grupos expostos a altas temperaturas, diminuíram em relação aos valores médios do grupo de controle. Analisando os valores dos grupos de corpos de prova expostos a altas temperaturas, observou-se que não há um padrão quanto à variação de densidade média. E quanto à variação da resistência à compressão paralela às fibras, observou-se que os grupos expostos à ação da temperatura por mais tempo apresentaram valores de resistência maiores quando comparados com os que foram expostos por menos tempo.

Palavras-chave: Estruturas de madeira. Propriedades físicas. Propriedades mecânicas. Propriedades térmicas. Altas temperaturas. Corpos de prova. Ensaio.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 13 |
| 2.1 Composição da madeira | 13 |
| 2.2 Comportamento da madeira à altas temperaturas | 14 |
| 2.4 Termorreificação | 18 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 19 |
| 3.1 Obtenção e preparação dos corpos de prova | 19 |
| 3.2 Aquecimento dos corpos de prova | 22 |
| 3.3 Ensaio mecânico | 23 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 25 |
| 5 CONCLUSÃO | 29 |
| 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 30 |

1 INTRODUÇÃO

A madeira, ainda pouco utilizada estruturalmente no Brasil quando comparada a outros materiais (como concreto e aço), possui grande potencial para a construção civil. Um material renovável, com baixo consumo de energia para produção, com elevada relação entre resistência e peso, possibilitando projetar estruturas leves, com propriedades mecânicas adequadas ao uso estrutural, como alta resistência à compressão e à flexão, e ainda, com satisfatórios isolamentos térmico e acústico. Segundo Morikawa (2006 *apud* RESENDE; MAGALHÃES, 2015), a madeira se apresenta como uma melhor alternativa quando comparada ao aço e ao concreto, do ponto de vista ambiental. No cenário mundial, a madeira é largamente utilizada na construção civil, principalmente nos Estados Unidos, Canadá, Japão e países do norte Europeu, sobretudo pela combinação do seu potencial sustentável ao seu desempenho técnico (RESENDE; MAGALHÃES, 2015). O uso intenso da madeira nesses países se justifica pela grande racionalização e industrialização dos seus sistemas construtivos (MANRIQUEZ; MORAES, 2009).

De acordo com Morikawa (2006 *apud* RESENDE; MAGALHÃES, 2015), o Brasil abriga uma das maiores florestas do mundo, sendo o 14º maior exportador de madeira. Shingue (2018 *apud* JUNIOR, 2019), apontou que cerca de 54,4% do território nacional brasileiro é composto por florestas, mas apenas 1,5% desta parcela representa áreas plantadas, criadas artificialmente. Apesar disso, ainda é um material subutilizado estruturalmente. Maciel (2006 *apud* RESENDE; MAGALHÃES, 2015), afirmou que isso pode ocorrer devido ao preconceito quanto o desempenho do material na construção civil. Resende e Magalhães (2015) apontaram a resistência à sua utilização em virtude da falta de conhecimento técnico e da ausência de tecnologias adequadas. Dessa forma, a madeira é utilizada de forma incorreta, levando a um desempenho insatisfatório e reforçando o receio popular.

Um dos grandes equívocos do senso comum é a ideia de baixa resistência da madeira ao fogo, por se tratar de um material combustível. Mas, o conhecimento do comportamento da madeira quando exposta à altas temperaturas permite ao projetista prever o tempo de resistência do elementos estruturais à uma situação de incêndio (FIGUEROA, 2008). E uma estrutura de madeira bem dimensionada apresenta melhor resistência ao fogo quando comparada a outros materiais estruturais (SZUCS *et al*, 2006 *apud* GALDINO, 2012).

Dessa forma, o objetivo neste trabalho é avaliar a resistência mecânica da madeira de Eucalipto (*Eucalyptus spp.*), quando submetida à temperatura de 300°C, por três diferentes

tempos de exposição. É avaliada a resistência à compressão paralela às fibras por se tratar de esforço que ocorre de forma frequente em estruturas de madeira. Como complemento ao trabalho, é analisada também a densidade média aparente, uma vez que é comum correlacionar a densidade da madeira com a resistência paralela às fibras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Composição da madeira

A madeira é formada por células dispostas axialmente e radialmente, conectadas entre si pela lignina, atribuindo sustentação ao tronco. Essas células se desenvolvem em diferentes estágios, processos naturais que resultam em um material heterogêneo, com alta variabilidade de características tanto entre espécies como dentro da mesma árvore (ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989 *apud* FIGUEROA, 2008).

As propriedades físico-químicas da madeira interferem diretamente na resistência deste material. Sobre a sua composição, Figueroa (2008), explicou:

A madeira é composta basicamente por celulose, lignina e hemicelulose. A celulose constitui aproximadamente 50 % deste material em peso. Durante o crescimento da madeira, as moléculas de celulose são ordenadas em microfibrilas, que, por sua vez, são organizadas em elementos estruturais maiores que compõem a parede celular das fibras de madeira. Em madeiras moles, a lignina compõe de 15 a 35 %. Embora a lignina esteja presente na parede celular, ela está concentrada no exterior e entre as células, formando a matriz interfacial, enquanto que a celulose e a hemicelulose formam os traqueídeos tubulares paralelos às fibras em madeiras.

A Tabela 1 apresenta os principais componentes da madeira, os quais irão influenciar o seu comportamento quando exposta ao aquecimento.

Tabela 1- Composição química média da madeira (%).

| Componentes | Presença |
|----------------------|-----------------|
| Celulose | 40 - 45% |
| Hemicelulose | ≈ 20% |
| Lignina | 15 – 35% |
| Outros constituintes | Até 10% |

Fonte: Winandy e Rowell (2005).

Sendo um material biológico, a madeira é formada por moléculas constituídas principalmente por carbono, o que confere ao material a classificação de sustentável, uma vez que retira carbono da atmosfera e o estoca durante o processo de formação e da vida útil.

2.2 Comportamento da madeira à altas temperaturas

Para entender o comportamento da madeira quando exposta à elevação de temperatura é preciso considerar seus elementos constituintes. Sob ação térmica, a madeira sofre uma decomposição dos seus componentes: celulose, hemiceluloses e lignina (FIGUEROA, 2008). As alterações que podem ocorrer na madeira quando exposta a diferentes níveis de temperaturas, de acordo com Schaffer (1973 apud MANRIQUEZ; MORAES), são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Alterações provocadas termicamente na madeira seca em atmosfera inerte.

| Temperatura (°C) | Alterações na madeira |
|------------------|--|
| 55 | A estrutura natural da lignina é alterada. A hemicelulose começa a amolecer. |
| 70 | Começa a retração transversal da madeira. |
| 110 | A lignina lentamente começa a perder peso. |
| 120 | O teor de hemicelulose começa a diminuir e celulose alfa começa a aumentar. A lignina começa a amolecer. |
| 140 | A água de impregnação é liberada. |
| 160 | A lignina se funde e começa a ressolidificar. |
| 180 | A hemicelulose começa a perder peso rapidamente depois de ter perdido 4%. A lignina da membrana de pontuação escoca. |
| 200 | A madeira começa perder peso rapidamente. As resinas fenólicas começam a se formar e a celulose a se desidratar. |
| 210 | A lignina solidifica. A celulose amolece e despolimeriza-se. As reações endotérmicas transformam-se em exotérmicas. |
| 225 | A cristalinidade da celulose diminui e é retomada. |
| 280 | A lignina atinge 10% de perda de peso. A celulose começa a perder peso. |
| 288 | Temperatura adotada para carbonização da madeira. |
| 300 | O cerne amolece irreversivelmente. |
| 320 | A hemicelulose é completamente degradada. |
| 370 | A celulose apresenta perda de 83% de seu peso inicial. |
| 400 | A madeira é completamente carbonizada. |

Fonte: Schaffer (1973 apud MANRIQUEZ; MORAES).

Mady (2011 apud Oliveira, 2012), descreveu o comportamento da madeira exposta ao fogo, com diferentes dimensões, a seguir:

Apesar de a madeira ser considerada um material inflamável, quando apresenta dimensões superiores a 25 mm (topo) é mais lentamente consumida pelo fogo que outros materiais. Isto ocorre pois quando o fogo

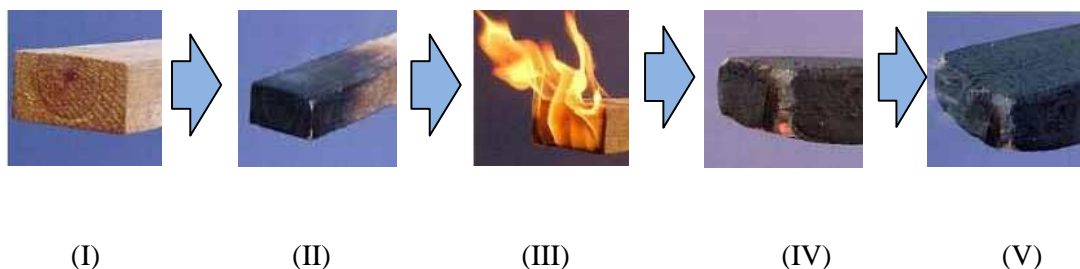
atinge a madeira, destrói rapidamente a superfície, formando uma fina camada de carvão que retarda a propagação de oxigênio e, conseqüentemente, das chamas em direção ao interior da peça, fazendo com que o incêndio perca velocidade. Peças com 50 mm de espessura podem ser consideradas sempre mais seguras que as estruturas de aço. Abaixo de 20 mm, as peças de madeira tornam-se elementos de alimentação do incêndio e, portanto, devem ser evitadas em construções (MADY, 2011 apud OLIVEIRA, 2012).

De acordo com Alvarez (2000 *apud* FIGUEROA, 2008), raramente incêndios têm início em elementos de madeira maciça, estas, de dimensões consideráveis, não ardem rapidamente. A degradação térmica da madeira ocorre aproximadamente acima de 100 °C, devido a dilatação e movimentação dos seus componentes quando exposta a altas temperaturas. A ignição da madeira, sem chama piloto ocorre acima de 400°C, enquanto com chama piloto atuando por um tempo significativo a ignição ocorre em torno de 300 °C (HARTL, 1995 *apud* FIGUEROA, 2008).

A madeira é um material combustível, não queima diretamente em condições normais, mas se decompõe em gases, que expostos ao calor provocam chamas. Esses gases vão aquecendo as camadas mais internas da madeira, que por sua vez vão liberando mais gases inflamáveis, criando um processo de combustão em cadeia (FIGUEROA 2008). A combustão da madeira baseia-se na pirólise, em condições normais (PINTO, 2001).

De acordo com Pinto (2001 *apud* Galdino 2012) pode-se dividir as fases da degradação térmica conforme a Figura 1, sendo: (I)-peça de madeira; (II)-pirólise lenta, (entre II e III)-pirólise rápida, (III)-combustão flamejante e (IV)-combustão incandescente, (V) fumaça como redísuo da combustão incompleta.

Figura 1 – Fases de degradação térmica da madeira.



Fonte: Galdino (2012).

Ante o exposto, parece certo considerar que as dimensões das peças de madeira e os valores da temperatura influenciam na sua degradação. Nesse sentido, é importante mencionar

que peças estruturais geralmente têm dimensões consideradas vantajadas, característica considerada dificultadora na propagação de incêndios e favorável à segurança das estruturas.

2.3 Resistência mecânica da madeira sob ação térmica

Uma vez que admite-se que a madeira pode ser degradável sob ação de elevadas temperaturas, faz-se necessário também o entendimento da influência da ação térmica sobre as propriedades do material. Na sequência, destacam-se trabalhos de autores que corroboram sobre o assunto.

Oliveira *et al.* (2017 *apud* SANTOS;OLIVEIRA, 2018) apontaram que podem ser reversíveis os efeitos que a madeira sofre quando exposta por um período de até duas horas a temperaturas abaixo de 100°C. E que quando expostas à temperaturas acima de 100°C, os efeitos passam a ser irreversíveis quando recolocadas em equilíbrio com o ambiente.

White (2002 *apud* MANRIQUEZ;MORAES, 2009), relacionou a resistência da madeira ao fogo à existência de uma camada carbonizada da madeira e à seção residual. Na Figura 2 estão representadas essas camadas que podem surgir a partir da exposição da madeira à altas temperaturas.

Figura 2 - Esquemática das camadas de uma peça de madeira quando exposta à altas temperaturas.



Fonte: Carpinteria, 2007

A taxa de carbonização, podendo ser expressa pela perda de massa (g/s) ou pelo avanço da carbonização (mm/min), possibilita avaliar a resistência da madeira ao fogo. Indica a velocidade que a peça se converte em carvão e sua consequente redução da seção transversal resistente, principal fator responsável pela falha de elementos estruturais de madeira (PINTO 2005; FIGUEROA 2008).

No Quadro 2 encontram-se valores de taxa de carbonização para diferentes tipos de madeira e com diferentes referências.

Quadro 2 - Taxas de carbonização

| Espécie da madeira | Massa específica (kg/m ³) | Taxa de carbonização linear (mm/min) | Taxa de carbonização não linear (mm/min) | | Arredondamento | Espessura da camada carbonizada (mm) | Bibliografia | | | |
|---|---------------------------------------|--------------------------------------|--|-----------|---|--------------------------------------|----------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | | β_0 | β_n | | | | | | |
| Coníferas | <i>Southern pine</i> | 509 | 1,24 | 0,56 | | | Wood handbook (1999) | | | |
| | <i>Western red cedar</i> | 310 | 1,22 | 0,56 | | | | | | |
| | <i>Redwood</i> | 343 | 1,28 | 0,58 | | | | | | |
| | <i>Engelman spruce</i> | 425 | 1,56 | 0,70 | | | | | | |
| Folhosas | <i>Basswood</i> | 399 | 1,06 | 0,48 | | | | | | |
| | <i>Hard maple</i> | 691 | 1,46 | 0,66 | | | | | | |
| | <i>Red oak</i> | 664 | 1,59 | 0,72 | | | | | | |
| | <i>Yellow poplar</i> | 504 | 1,36 | 0,61 | | | | | | |
| | <i>Eucalyptus citriodora</i> | 1060 | | 0,58 | | | | | | |
| <i>Eucalyptus grandis</i> | 880 | | 0,58 | | | | | | | |
| <i>Schizolobium amazonicum</i> | | 365 | | 0,81 | | | | | | Pinto (2005) |
| Coníferas e faia: | MLC | ≥ 290 | | 0,65 | | | | 0,70 | $d_{char,s} = \beta_n \cdot t$ | $d_{char,s} = \beta_0 \cdot t$ |
| | Madeira maciça | ≥ 290 | | 0,65 | 0,80 | | | | | |
| Folhosas | Madeiras maciças ou MLC | ≥ 290 | | 0,65 | 0,70 | | | | | |
| | Madeira maciça ou MLC | ≥ 450 | | 0,50 | 0,55 | | | | | |
| LVL | | ≥ 480 | | 0,65 | 0,70 | | | | | |
| Painéis | Lambris | ≥ 450 | | 0,90 | | | | | | |
| | Compensado | ≥ 450 | | 1,0 | | | | | | |
| | Derivados de madeira | ≥ 450 | | 0,90 | | | | | | |
| Madeira natural: pinheiro, abeto, espruce, pinheiro-silvestre, pinheiro-negro, pinheiro-larício, pinho-marítimo, hemlock, álamo, castanheiro, carvalho, douglas, etc. | | | | 0,70 | Se: $t > 30$ min, $r = t \cdot \frac{\beta_n}{2} + 15 \cdot \beta_0$ | $\delta_c = \beta_0 \cdot t$ | Norma Francesa | | | |
| MLC Pinheiro, abeto, pinheiro-silvestre, pinheiro-marítimo, álamo. Madeiramento de interior (Classe A, B, C NFB 53-510). | | | | 0,70 | | | | | | |
| Folhosas: carvalho, doussie, sipo, teca, makoré. | | | | 0,50 | | | | | | |
| Outras espécies de folhosas ou coníferas | | | | 0,60 | | | | | | |
| Todas as estruturas listadas no apêndice A da BS 5268: Parte 2:1989. | | | | 0,67 | Se: $t > 30$ min $b < 50$ mm $r = t \cdot b_0$ | $dc = \beta_0 \cdot t$ | Norma Britânica | | | |
| Cedro-vermelho-do-nordeste. | | | | 0,83 | | | | | | |
| Folhosas, teor de umidade de 18%, ≥ 650 kg/m ³ | | | | 0,50 | | | | | | |

Fonte: Manriquez e Moraes (2009).

A madeira, exposta ao fogo, sustenta sua resistência mecânica por mais tempo, quando comparada ao aço (FIGUEROA, 2008). A Figura 3 apresenta uma situação de estruturas mista, de madeira e aço, depois da sua exposição ao fogo. Observa-se que a estrutura de aço se deforma completamente, enquanto a de madeira ainda apresenta capacidade de resistência.

Figura 3 - Estrutura de aço e madeira após incêndio



Fonte: Carpinteria, 2013

Alguns trabalhos já foram realizados para entender o comportamento da resistência mecânica da madeira após exposição à altas temperaturas. Schaffer (1973 *apud* SANTOS;OLIVEIRA,2018), Manríquez (2008), Oliveira *et al.* (2016 *apud* SANTOS;OLIVEIRA,2018) encontraram uma relação linear inversamente proporcional entre a resistência à compressão paralela às fibras e a temperatura de exposição, ou seja, quanto maior a temperatura, menor a resistência. Porém, não se pode afirmar que esse comportamento é um padrão, os resultados de estudos até o momento se mostram contraditórios em alguns aspectos. Pesquisadores já constataram aumento em algumas propriedades mecânicas da madeira, outros apontaram uma redução dessas propriedades, e ainda, alguns pesquisadores não observaram variação. Essas diferenças podem estar relacionadas às diferentes formas que os experimentos foram realizados (FIGUEROA, 2008).

2.4 Termorreificação

Há uma procura por métodos de tratamento de madeira com menor impacto ambiental, e a modificação térmica da madeira pode ser considerado um processo não agressor do meio ambiente, visto que não utiliza substâncias nocivas e produtos químicos (SANDAK *et al.*, 2015 *apud* GUIRARDI, 2020).

Com a finalidade de melhorar características físico-mecânicas, químicas e biológicas, um tratamento possível é a retificação térmica ou termorreificação (NAVI E SANDBERG, 2012 *apud* HULLER *et al.*, 2017). Este processo consiste em submeter a madeira a altas temperaturas objetivando melhorar seu desempenho através de pequenas alterações na sua composição química (MODES *et al.*, 2017). O processo de tratamento térmico resulta, normalmente, em perda de massa, devido à diminuição da higroscopicidade, propiciando

maior estabilidade dimensional. (HILL, 2006; THYBRING, 2013 *apud* GUIRARDI, 2020)

Essa técnica foi utilizada nos últimos 20 anos na Europa, e se trata de um processo em escala industrial em países como França, Alemanha, Holanda e Finlândia (DUBEY, 2010 *apud* HULLER *et al.*, 2017).

Os estudos realizados na área não apresentam uma regra geral de comportamento. Por exemplo, Modes *et. al* (2017) e Yildiz *et al.* (2006 *apud* MODES *et al.*, 2017), utilizando *Pinus taeda*, *Eucalyptus grandis* e *Picea orientalis* em seus estudos, indicaram perda de resistência à compressão paralela às fibras da madeira quando expostas ao tratamento de retificação térmica. Enquanto, Boonstra *et al.* (2007 *apud* MODES *et al.*, 2017), utilizando *Pinus sylvestris*, encontraram um aumento de resistência à compressão paralela às fibras de peças submetidas à termorretificação quando comparadas às peças de controle.

Tiemann (1915 *apud* Melo *et. al.*, 2019), afirmou que a técnica de retificação térmica pode ser utilizada para tratamento de várias espécies, mas que precisa ser otimizada de acordo com cada caso. Guirardi (2020), apontou que fatores como, por exemplo, temperatura final do processo, tempo de exposição, atmosfera circundante e espécie utilizada, interferem na variação dos efeitos propiciados pela termorretificação.

Assim, para madeiras destinadas ao uso estrutural, parece plausível investigar o que ocorre para cada espécie quando submetidas a elevações de temperatura, uma vez que pode-se concluir que não há um comportamento padrão no que diz respeito à resistência mecânica da madeira e no Brasil não há norma específica sobre o assunto.

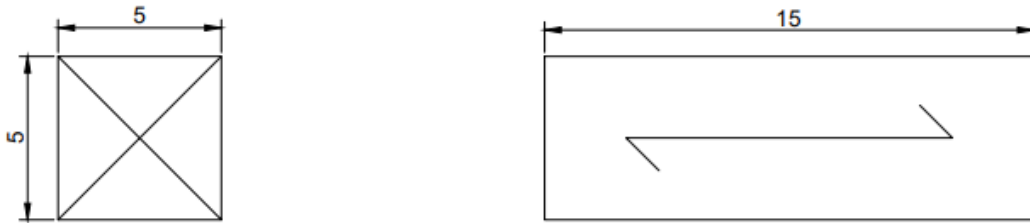
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Obtenção e preparação dos corpos de prova

Para a realização deste estudo, os corpos de prova foram confeccionados seguindo orientações do Anexo B da NBR 7190 (ABNT, 1997). Estes foram extraídos aleatoriamente de amostras de madeira Eucalipto (*Eucalyptus spp.*) adquiridas no mercado local de Lavras, MG. Os corpos de prova foram confeccionados no Laboratório da Madeira do Departamento de Ciências Florestais (DCF) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), com o auxílio de uma serra circular de bancada, com forma prismática e seção transversal quadrada de aproximadamente 5,0 cm de lado e comprimento de aproximadamente 15,0 cm, conforme exigência da NBR 7190 (ABNT, 1997) para ensaios de compressão paralela às fibras (Figura

4). Em seguida, foram selecionados 24 corpos de prova, descartando os que apresentavam defeitos.

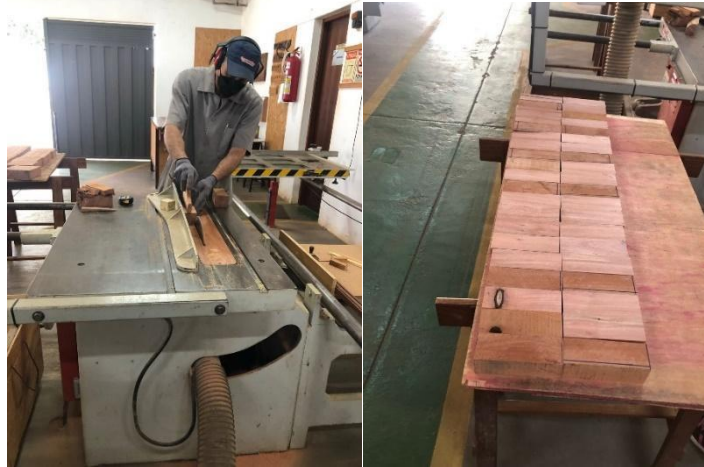
Figura 4 - Dimensões do corpo de prova em centímetros.



Fonte: Da autora (2022).

Na Figura 5 é mostrado o processo de corte dos corpos de prova (à esquerda) e as peças organizadas para serem inspecionadas visualmente (à direita).

Figura 5 - Confeção dos corpos de prova com uso da serra circular.



Fonte: Da autora (2022).

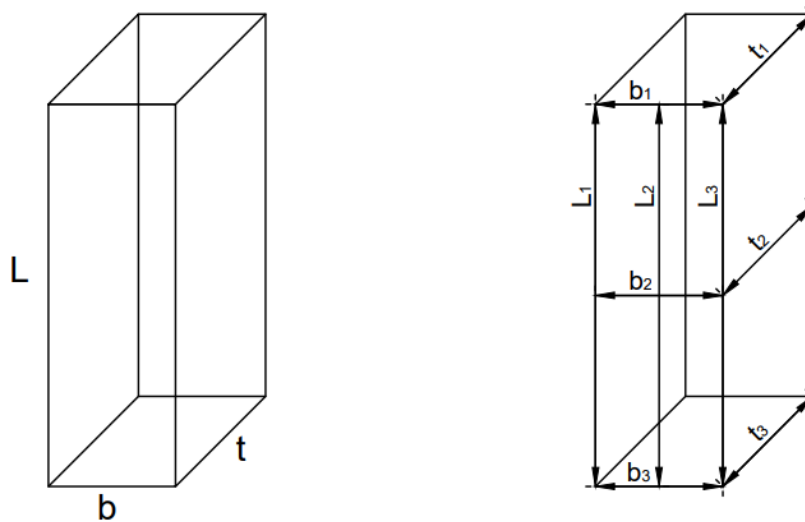
Todos os corpos de prova foram enumerados (Figura 6) e pesados com auxílio de uma balança digital. Em seguida, com auxílio de um paquímetro Vernier Caliper 200x0,02mm/8”, foram determinados o comprimento médio, a largura média e a espessura média de cada peça, a partir de três medidas realizadas em cada extremidade e no centro das faces de referência, conforme desenho esquemático mostrado na Figura 7. A Figura 8 apresenta uma das medições de espessura sendo realizada.

Figura 6 – Corpos de prova enumerados.



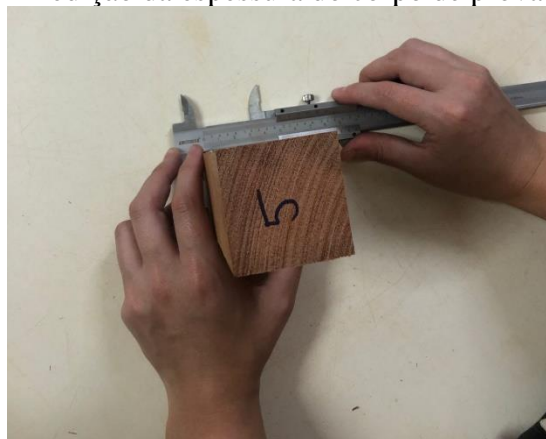
Fonte: Da autora (2022)

Figura 7 - Referência de localização das medições de comprimento, largura e espessura.



Fonte: Da autora (2022).

Figura 8 – Medição da espessura do corpo de prova número 5.



Fonte: Da autora (2022)

A partir disso, com os dados levantados, pela relação entre massa e volume, também foram calculadas as densidades médias de cada corpo de prova, em g/cm.

3.2 Aquecimento dos corpos de prova

Para exposição dos corpos de prova à temperatura de 300°C foi utilizado um forno mufla do Laboratório de Biomateriais do Departamento de Ciências Florestais (DCF) da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Como alternativa para as cápsulas isolantes utilizadas dentro das muflas, os corpos de prova foram todos envoltos por papel alumínio. Dessa forma, garantiu-se a segurança do equipamento, otimizou-se o tempo de colocação e retirada das peças de dentro do forno, evitando assim que a temperatura variasse muito ao abrir e fechar o equipamento, além de assegurar que as faces dos corpos de prova estivessem expostas de uma maneira mais igualitária à temperatura desejada (Figura 9).

Figura 9 - Corpos de prova dentro do forno mufla.



Fonte: Da autora (2022).

Os corpos de prova foram divididos em três grupos de diferentes tempos de exposição à ação da temperatura. Um quarto grupo não foi submetido ao aquecimento, sendo considerado o grupo de controle. Cada grupo com seis corpos de prova, atendendo à quantidade mínima exigida pela NBR 7190 (ABNT, 1997) para a realização de uma caracterização simplificada. O forno mufla foi calibrado com o auxílio de um termopar (Figura 8), ajustando a temperatura mostrada no seu visor com a temperatura interna medida pelo termopar, e em seguida programado para manter a temperatura de 300°C.

Figura 10 - Forno mufla e termopar utilizados.



Fonte: Da autora (2022).

A partir disso, os corpos de prova foram expostos à temperatura de 300°C dentro da mufla. Os enumerados de 1 a 6 permaneceram no forno por 10 minutos, os enumerados de 7 a 12 permaneceram por 20 minutos, os enumerados de 13 a 18 permaneceram por 30 minutos, e os enumerados de 19 a 24 não foram expostos à ação do equipamento, com o objetivo de obter valores referência de resistência para comparação com a resistência das peças expostas à altas temperaturas. Devido ao tamanho limitado da mufla, foram colocados dentro do equipamento, por vez, três corpos de prova.

Após serem retirados do forno, os corpos de prova foram acondicionados em uma caixa térmica de isopor forrada com papel alumínio para evitar a troca de oxigênio com o ambiente, a fim de evitar a combustão das peças.

Em seguida, em temperatura ambiente, foi retirado o papel alumínio que envolvia os corpos de prova e, eles foram novamente pesados com auxílio de uma balança digital e medidos com um paquímetro com a mesma metodologia utilizada antes da exposição a altas temperaturas. A partir disso, para cada corpo de prova, foram calculadas as densidades médias, em g/cm³, após exposição a altas temperaturas, conforme metodologia anterior, e as áreas das seções a serem comprimidas no ensaio de resistência, em cm².

3.3 Ensaio mecânico

Para determinação da resistência mecânica paralela às fibras, um dia após o aquecimento dos corpos de prova, foram realizados ensaios no Laboratório de Estruturas do

Departamento de Engenharia (DEG) da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Utilizando a Máquina Universal de Ensaio, de capacidade 300 kN, foram determinadas as máximas forças de compressão, aplicadas aos corpos de prova. As peças foram posicionadas no centro da travessa inferior, e uma travessa superior móvel, a uma velocidade de 0,2 mm/min, se movimentava provocando uma aplicação uniaxial de carga compressiva nos corpos de prova (Figura 11).

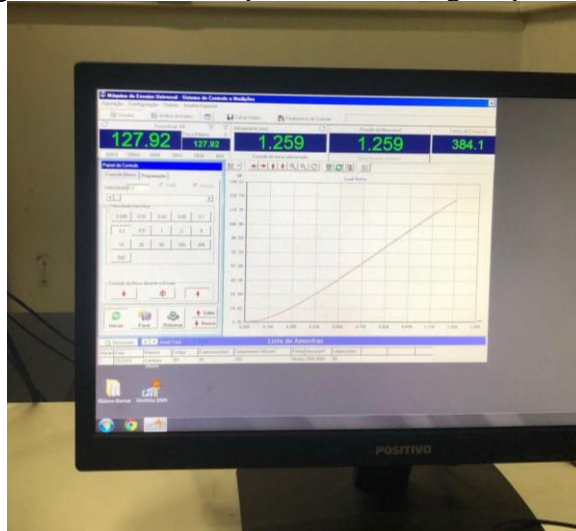
Figura 11 - Corpo de prova submetido ao ensaio de compressão na Máquina Universal de Ensaio.



Fonte: Da autora (2022).

Simultaneamente, um monitor apresentava graficamente as cargas aplicadas, indicando a carga máxima suportada pelo corpo de prova e o tempo de duração (Figura 10). Cada ensaio durou cerca de 6 minutos.

Figura 12 - Monitor apresentando cargas aplicadas.



Fonte: Da autora (2022).

A partir disso, com as áreas das seções a serem comprimidas, que foram determinadas após a exposição a altas temperaturas, e as cargas máximas suportadas pelos corpos de prova durante o ensaio, foram calculadas a resistência à compressão paralela às fibras de cada corpo de prova, a partir da Equação 1:

(1)

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,máx}}{A} \times 10$$

Onde,

f_{c0} : resistência à compressão paralela às fibras, em Mpa.

$F_{c0,máx}$: máxima força de compressão aplicada ao corpo de prova durante o ensaio, em kN.

A: área da seção transversal comprimida após a queima, em cm².

Após determinadas as densidades e as resistências à compressão paralela às fibras, os dados foram organizados e analisados. Os resultados são apresentados na sequência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A exposição das peças à alta temperatura provocou um processo de pirólise, com decomposição da matéria. É importante salientar que em nenhuma peça houve carbonização ou efeitos de arredondamentos das quinas das seções.

A partir dos dados individuais de resistência à compressão paralelas às fibras de cada corpo de prova, foram calculadas as resistências médias e os respectivos desvios padrões de cada grupo de corpos de prova (cp's), divididos com relação ao tempo de exposição a altas temperaturas (0 min, cp's 19 ao 24; 10 min, cp's 1 ao 6; 20 min, cp's 7 ao 12; 30 min, cp's 13 ao 18), além do cálculo da redução, em porcentagem, da resistência média dos cp's expostos à altas temperaturas em relação à resistência do cp's de controle. Os dados estão dispostos na Tabela 2.

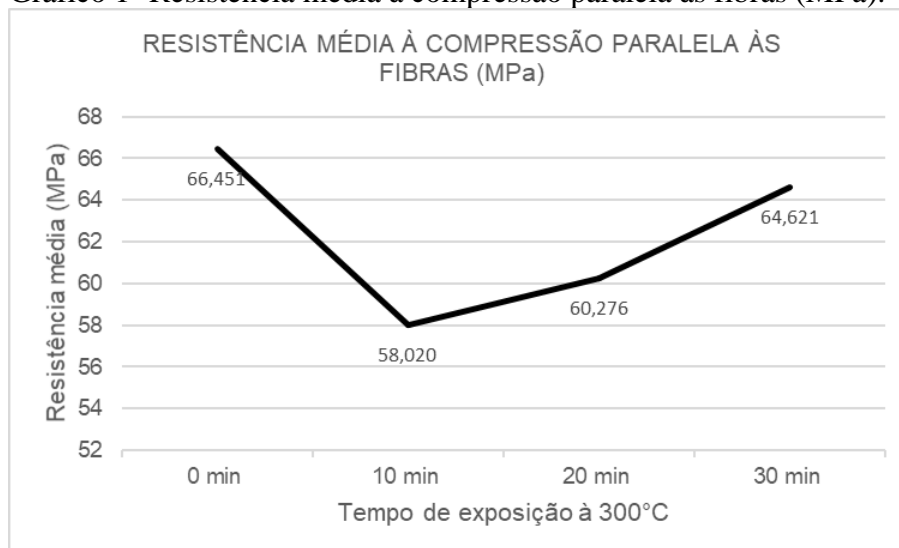
Tabela 2 - Resistência média à compressão paralela às fibras (MPa).

| RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS (MPa) | | |
|--|------------------------------------|--------------------------------|
| TEMPO DE EXPOSIÇÃO À 300°C | RESISTÊNCIA MÉDIA (MPa) | DESVIO PADRÃO (MPa) |
| 0 min (Cp's 19 ao 24) | 66,451 | 5,114 |
| 10 min (Cp's 1 ao 6) | 58,020 | 4,678 |
| 20 min (Cp's 7 ao 12) | 60,276 | 2,284 |
| 30 min (Cp's 13 ao 18) | 64,621 | 5,059 |

Fonte: Da autora (2022).

É ilustrado no Gráfico 1 a variação da resistência média à compressão paralela às fibras (MPa) em relação ao tempo de exposição a altas temperaturas.

Gráfico 1- Resistência média à compressão paralela às fibras (MPa).



Fonte: Da autora (2022).

Houve uma redução da resistência média à compressão paralela às fibras dos grupos de corpos de prova submetidos à exposição a altas temperaturas em relação ao grupo de controle. Essa variação está apresentada, em porcentagem, na Tabela 3.

Tabela 3 - Variação da resistência média à compressão paralela às fibras (%).

| VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS (%) | | | | |
|--|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| CP's SUBMETIDOS À EXPOSIÇÃO À 300°C X CP's NÃO SUBMETIDOS | | | | |
| TEMPO DE EXPOSIÇÃO À 300°C | 0 min (Cp's 19 ao 24) | 10 min (Cp's 1 ao 6) | 20 min (Cp's 7 ao 12) | 30 min (Cp's 13 ao 18) |
| RESISTÊNCIA MÉDIA (MPa) | 66,451 | 58,020 | 60,276 | 64,621 |
| REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA MÉDIA (%) | | 12,688% | 9,292% | 2,754% |

Fonte: Da autora (2022).

Também foram calculadas as variações de densidade média, em porcentagem, de antes e depois da exposição a altas temperaturas, a partir dos dados de dimensões e massa determinados, obtendo-se os resultados mostrados na Tabela 4.

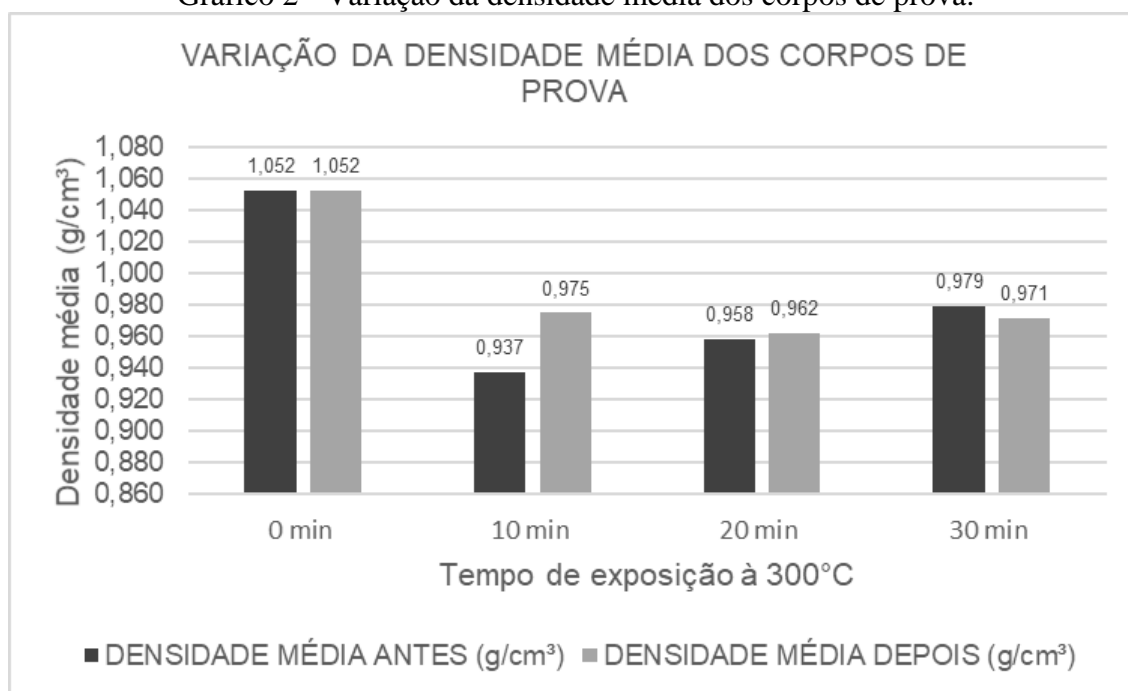
Tabela 4 - Variação da densidade dos corpos de prova (%)

| VARIAÇÃO DA DENSIDADE DOS CORPOS DE PROVA (%) | | | | |
|--|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| ANTES X DEPOIS EXPOSIÇÃO À 300°C | | | | |
| TEMPO DE EXPOSIÇÃO À 300°C | 0 min (Cp's 19 ao 24) | 10 min (Cp's 1 ao 6) | 20 min (Cp's 7 ao 12) | 30 min (Cp's 13 ao 18) |
| DENSIDADE MÉDIA ANTES (g/cm ³) | 1,052 | 0,937 | 0,958 | 0,979 |
| DENSIDADE MÉDIA DEPOIS (g/cm ³) | 1,052 | 0,975 | 0,962 | 0,971 |
| VARIAÇÃO DA DENSIDADE MÉDIA (%) | | 3,902 | 0,399 | -0,792 |

Fonte: Da autora (2022).

O Gráfico 2 compara, em g/cm³, os valores de densidade média dos corpos de prova antes e depois de serem submetidos a altas temperaturas, ilustrando a variação.

Gráfico 2 - Variação da densidade média dos corpos de prova.



Fonte: Da autora (2022).

Quando a madeira é exposta ao aquecimento, a hemicelulose é o primeiro carboidrato a se degradar, depois a celulose e, em seguida, a lignina (ROFFAEL; SCHALLER, 1971; SCHNIEWIND, 1985 *apud* MANRIQUEZ;MORAES, 2009). Nos estágios iniciais do aquecimento as hemiceluloses são facilmente degradadas, o que tem sido proposto como principal fator diretamente ligado à perda da resistência da madeira (ESTEVES; PEREIRA, 2009 *apud* LENGOWSKI, 2011).

Dessa forma, quando exposta a altas temperaturas, tensões surgem a partir da diferença de umidade entre as extremidades e o centro da peça, como efeito da expansão ou retração térmica da madeira, ocasionando fendas na estrutura do material (SKAAR, 1984; SIAU, 1995 *apud* FIGUEROA 2012).

Logo, a redução de densidade média dos corpos de prova submetidos à altas temperaturas em comparação com os corpos de prova de controle sugerem perda de água e de materiais orgânicos após a exposição. Além disso, entre as peças submetidas ao aquecimento, densidades diferentes antes e depois sem um padrão definido podem ainda ser explicadas por uma expansão ou retração térmica das peças, que podem ter influenciado nas medições das

dimensões, que foram realizadas um dia após a exposição a altas temperaturas dos corpos de prova.

Quanto à resistência à compressão paralela às fibras, é possível afirmar que a temperatura interferiu nos resultados, visto que houve uma redução de resistência dos corpos de prova submetidos a altas temperaturas quando comparados aos corpos de prova de controle. Entretanto, comparando somente as peças expostas ao calor entre si, os valores sugerem que pode ter havido um efeito de retificação térmica nas peças que foram submetidas a mais tempo de exposição, de forma favorável, ou seja, as peças expostas por mais tempo apresentaram resistências mais altas.

Conforme mencionam Poncsak *et al.* (2006 *apud* MODES *et al.*, 2017), fatores como temperatura, tempo de exposição, atmosfera circundante, taxa de aquecimento e, espécie utilizada influenciam nos efeitos da retificação térmica, nas alterações provocadas na estrutura da madeira e na variação de resistência mecânica.

5 CONCLUSÃO

Na literatura não há um padrão de comportamento quando a madeira é exposta a altas temperaturas. Os resultados variam de acordo com a espécie de madeira utilizada, a temperatura estabelecida, o tempo de exposição à ação da temperatura e a forma de realização do aquecimento.

Para a madeira ensaiada é parece plausível afirmar que devido à ação da temperatura pode ter ocorrido perda de água e de materiais orgânicos, interferindo na resistência à compressão paralela às fibras e na variação da densidade. Ambas propriedades apresentaram uma redução de valor após exposição à temperatura de 300°C, quando comparadas com os valores do grupo de controle.

Entre os grupos de corpos de prova expostos a altas temperaturas não houve um padrão quanto à variação de densidade média, o que pode ser explicado por uma expansão ou retração térmica das peças, que podem ter influenciado nas medições das dimensões. E, quanto à variação da resistência à compressão paralela às fibras, observa-se que os grupos expostos à ação da temperatura por mais tempo, apresentam uma resistência maior quando comparados com os que foram expostos por menos tempo, estes valores sugerem que pode ter havido um efeito de retificação térmica nas peças que foram submetidas a mais tempo de exposição, de forma favorável.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FIGUEROA, Manuel Jesús Manríquez. **Influência da temperatura sobre a resistência mecânica do paricá**. 2008. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

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

GALDINO, Danilo Soares. **Análise das propriedades da madeira de estrutura de telhado após a ocorrência de um incêndio**. 2012. Trabalho de conclusão de curso (Graduação, Curso Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2012.

GUIRARDI, Bruna Duque. **Efeito da termorreificação nas propriedades da madeira de desbaste de *Tectona grandis* L.F.** 2020. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 2020.

HULLER, Lenon Augusto Simon *et al.* Modificação térmica e propriedades tecnológicas da madeira de *Eucalyptus cloeziana*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [S. l.], v. 37, n. 90, p. 183–188, 2017. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/1288>. Acesso em: 15 julh. 2022.

JUNIOR, Ben-hur Jales e Silva. **Estruturas de madeira submetidas a condição de incêndio: comparativo normas NBR 7190 com Eurocode 5 1-2**. Palmas: IFT, 2019. JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E EXTENSÃO, 10., 2019, Palmas. Disponível em: <https://propi.ifto.edu.br/index.php/jice/10jice/paper/view/9487>. Acesso em: 10 julh. 2022.

MANRIQUEZ, M. J.; MORAES, P. D. de; Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 157-174, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/84J9dfRHFVdzF35xnjseXty/?lang=pt>. Acesso em: 09 julh. 2022.

MELO, Rafael *et al.* Efeito do tratamento térmico sobre a resistência da madeira de cambará a cupins subterrâneos. **Revista de Ciências Agrárias**. [S. l.], v. 42, n.3, p. 786-791, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.19084/rca.17079>. Acesso em: 13 julh. 2022.

MODES, Karina Soares. 2017. Efeito da termorreificação nas propriedades da madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v. 27, n.1, p. 291–302, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509826467>. Acesso em: 13 julh. 2022

A madeira, uma excelente proteção contra o fogo. **Carpinteria**, São Paulo, 23 mai. 2013. Disponível em: <http://estruturasdemadeira.blogspot.com/2013/05/a-madeira-uma-excelente-protecao-contr.html>. Acesso em 20 julh. 2022.

A madeira: um material construtivo resistente ao fogo. **Carpinteria**, São Paulo, 23 fev. 2007. Disponível em: <http://estruturasdemadeira.blogspot.com/2007/02/madeira-um-material-construtivo.html>. Acesso em: 20 julh. 2022.

MOTTA, J. P.; ALVES, R. C.; PAES, J. B. Efeito do tratamento térmico na resistência à flexão estática da madeira de *Tectona Grandis* L.f. **Construindo**. [S. l.], v. 5, n. 3, 2013. Disponível

em: <http://revista.fumec.br/index.php/construindo/article/view/2117>. Acesso em: 15 julh. 2022.

OLIVEIRA, Lúcia Klein. **Resistência mecânica da madeira: estudo da variação mediante ação do fogo**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

PINTO, Edna Moura. **Proteção contra incêndio para habitações em madeira**. 2001. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós-Graduação Escola de Engenharia de São Carlos) - Universidade de São Paulo, 2001.

PINTO, E. M.; JÚNIOR, C. C. . Estudo teórico e experimental sobre a degradação térmica e os gradientes térmicos da madeira de Eucalyptus de uso estrutural exposta ao fogo. **Revista Minerva**. v. 3, n. 2, p. 131-140, 2006. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001599581>. Acesso em: 06 julh. 2022.

RESENDE, D.; MAGALHÃES, L. N. de. Propriedades Mecânicas das Madeiras Paraju e Pinus sob ação térmica. **Construindo**. [S. l.], v. 7, n. 2, 2015. Disponível em: <http://revista.fumec.br/index.php/construindo/article/view/4013>. Acesso em: 15 julh. 2022.