

INFLUÊNCIA DE ALTAS TEMPERATURAS NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA MADEIRA DE *ANGELIM-VERMELHO*

INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURE INSHEAR STRENGTH OF WOOD *ANGELIM-VERMELHO*

A. L. C. Oliveira ⁽¹⁾, J. N. R. Mantilla ⁽²⁾, E. V. M. Carrasco ⁽³⁾ (A)

(1) Ing. Civil/Doutoranda, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte (MG), Brasil.

(2) Profa. Dra., Universidade Fumec, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Belo Horizonte (MG), Brasil

(3) Prof. Dr., Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura, Belo Horizonte (MG), Brasil.

Endereço de contato: mantilla@dees.ufmg.br; (A) Apresentador

Código de identificação: T3-32

Resumo

A madeira é um material natural sujeito a queima e carbonização. Para uso estrutural é de significativa importância a caracterização das propriedades mecânicas da madeira quando submetida a altas temperaturas. Este trabalho avalia o comportamento ao cisalhamento de amostras da madeira da espécie angelim vermelho [*Dinizia excelsa Duke*] submetidas a temperaturas no intervalo de 20 a 240°C. Definiu-se pela preparação de 88 corpos de prova de dimensões 50 x 50 x 50 (mm³) que foram ensaiados conforme procedimentos definidos na ABNT NBR 7190:1997. Onze corpos de prova foram utilizados para monitoramento da temperatura no interior da madeira utilizando-se termopares do tipo T conectados a um sistema de aquisição de dados. A resistência diminui rapidamente com a elevação da temperatura até 150°C e apresenta um aumento relativo até atingir a temperatura de transição vítrea (T_g) da madeira entre 160 e 240°C quando volta a diminuir de forma acentuada.

Palavras chave: incêndio; altas temperaturas; resistência ao cisalhamento

Abstract

Wood is a natural material subject to burning and charring. For structural uses, it is of significant importance the characterization of the mechanical properties of the wood when submitted to high temperatures. This work evaluates the shear behavior of samples of wood of the species angelim vermelho [*Dinizia excelsa Duke*] subjected to temperatures in the range of 20 to 240°C. It was defined by the preparation of 88 specimens of dimensions 50 x 50 x 50 (mm³) that were tested according to the procedures defined in ABNT NBR 7190: 1997. Eleven specimens were used to monitor the temperature inside the wood, using T-type thermocouples connected to a data acquisition system. Resistance decreases rapidly with increasing temperature up to 150°C and exhibits a relative increase until reaching the glass transition temperature (T_g) of the wood between 160 and 240°C when it decreases again sharply.

Keywords: fire; high temperatures; shear strength

1. INTRODUÇÃO

Elementos estruturais em madeira têm sido utilizados por séculos e numerosos exemplos por todo o mundo demonstram sua durabilidade [1]. A madeira é um material natural sujeito a queima e carbonização. Para uso estrutural é de significativa importância a caracterização das propriedades mecânicas da madeira quando submetida a altas temperaturas. Os efeitos do aumento da temperatura nos compostos de madeira provocam conforme [2] uma mudança transitória no nível de energia ou uma reorganização estrutural permanente nos componentes internos da madeira. A temperatura de transição vítrea (T_g) tem uma estreita relação com esta reorganização estrutural. Conforme [3] a T_g corresponde ao valor médio de um intervalo de temperaturas durante o aquecimento de um material polimérico em cuja fase amorfa adquire mobilidade com possibilidade de mudança de conformação. Conforme [4] e [5] a degradação térmica dos polímeros causa a redução da resistência mecânica da madeira. Para [4] além da variação no teor de umidade, outros fatores contribuem para a redução tais como a forma de aquecimento, o gradiente de temperatura, o período de exposição, a espécie da madeira e o tamanho da peça analisada. A redução de massa em relação ao acréscimo de temperatura é, conforme [6] um fenômeno observável no processo de pirólise da madeira quando as fortes mudanças nas tendências das curvas mostram a evolução do fenômeno em relação à temperatura de aquecimento. Segundo [7] os efeitos permanentes causados pela influência de temperaturas superiores a 65 °C se manifestam pela redução no peso dos carboidratos, perda de água de adesão, refletindo nas propriedades mecânicas da madeira, podendo ocorrer perdas de capacidade estrutural [7], [8], [9], [10]. Conforme [10] a degradação térmica da hemicelulose, caracterizada por apresentar cadeias carbônicas curtas, ocorre entre 160 e 260°C devida às suas estruturas ramificadas e a seu baixo peso molecular, o que facilita a sua rápida degradação, quando comparada aos outros componentes químicos da madeira. Já para [11] a redução de massa devido à eliminação de água pode ocorrer desde 100 °C até 250 °C sendo que parte dessa água ainda é chamada higroscópica (retida pelas paredes celulares e considerada como adsorvida junto às hidroxilas das cadeias de polissacarídeos e da lignina) enquanto outra parte é denominada água de constituição, cuja eliminação é acompanhada por uma degradação irreversível da madeira, sobretudo de seus grupos hidroxílicos. A demanda no mercado de madeira serrada utilizada na construção civil, em particular nas regiões sul e sudeste do Brasil, tem sua principal fonte na floresta tropical amazônica e muitas espécies não são aproveitadas de forma adequada em relação ao seu potencial, por falta de informações tecnológicas ou por falta de divulgação das informações já disponíveis [12]. Dentre as espécies folhosas destaca-se o angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke). Segundo [13] a madeira de angelim vermelho é encontrada em diversas regiões do Brasil: Acre, Amapá, Amazonas, Pará e Rondônia sendo conhecida por outros nomes dependendo da região de ocorrência: angelim, angelim-falso, angelim-ferro, angelim-pedra, angelim-pedra-verdadeiro, faveira-carvão, faveira-dura, faveira-ferro e faveira-grande. Apresenta como características principais: cerne e alburno pouco distintos pela cor, cerne castanho-avermelhado; brilho moderado; cheiro desagradável; gosto imperceptível; densidade alta; dura ao corte; grã direita tendendo a irregular; textura média a grossa; superfície pouco lustrosa (Figura 1).



Figura 1: Aspecto externo da madeira de angelim vermelho: (E) corte tangencial; (D) corte radial.
Fonte: [13].

Considerando que existe uma lacuna na compreensão dos principais fatores que influenciam a redução da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras frente à elevação de temperatura [14] este trabalho se propõe investigar a influência de temperaturas no intervalo de 20 a 240°C em amostras de madeira de angelim vermelho com base na análise de dados de massa, densidade aparente e resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. Para determinação da propriedade de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0} , em MPa) foram preparados corpos de prova na forma cúbica com aresta de 50 mm [15], principalmente, por apresentar um volume menor e menos complexidade na sua preparação e foram ensaiados conforme prescrições apresentadas em [16]. Os ensaios foram realizados no Centro de Pesquisa Avançada de Madeira, Móveis e novos Materiais - CPAM³, do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas 7 vigas de madeira de angelim vermelho, com seção nominal de 150 mm x 150 mm e comprimento nominal de 2500 mm, adquiridas no mercado madeireiro em Belo Horizonte, MG. As vigas ficaram acondicionadas ao ar nas dependências do CPAM³. Após o desdobrado em peças menores, as mesmas foram armazenadas para estabilização da umidade ao ar em temperatura ambiente até a preparação dos corpos de prova.

2.1 Preparação dos corpos de prova e condicionamento das amostras

Para determinação das características físicas de teor de umidade (U , em %) e densidade aparente (ρ_{ap} , em kg/m^3) das amostras, foram preparados 7 corpos de prova de dimensões 2 x 3 x 5 (cm^3) segundo prescrições propostas em [15] sendo um de cada viga. Para determinação da propriedade de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0} , em MPa) foram preparados 84 corpos de prova na forma cúbica com aresta de 50 mm [14] sendo 7 destinados ao ensaio na temperatura ambiente (20°C). Foram preparados 77 corpos de prova destinados ao ensaio após condicionamento sob temperaturas elevadas, sendo 7 corpos de prova para cada uma das temperaturas: 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240°C a uma taxa de aquecimento média de 4,32°C/min, desvio padrão de 1,03°C/min e coeficiente de variação de 23,80%.

Para monitoramento das temperaturas foram disponibilizados 11 corpos de prova denominados testemunhas que abrigaram no seu interior um termopar do tipo T, com sensibilidade para capturar dados das temperaturas investigadas. Para condicionamento dos corpos de prova nas temperaturas de 40 até 240°C foram utilizadas câmaras de aquecimento elétricas.

2.2 Massa e volume dos corpos de prova

Antes de serem aquecidos todos os corpos de prova tiveram suas dimensões aferidas com paquímetro com precisão de 0,01 mm, para medidas radiais, tangenciais e longitudinais do corpo de prova, visando a determinação dos volumes (V , m^3). Suas massas (m , kg) foram aferidas em balança digital com capacidade de 500g e precisão de 0,01g. Imediatamente após serem retirados das câmaras de aquecimento repetiu-se o processo de medidas das dimensões e aferição das massas para determinação das densidades aparentes para cada nível de temperatura.

2.3 Densidade aparente

Com os valores de massa e volume determinados para todos os corpos de prova destinados ao ensaio de cisalhamento paralelo às fibras, calculou-se as densidades aparentes ($\rho_{U\%,T}$), no teor de umidade do corpo de prova ($U\%$), para cada uma das temperaturas (T), pela equação:

$$\rho_{U\%,T} = \frac{m}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1)$$

2.4 Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras

Utilizou-se máquina universal com capacidade de 300 KN. O carregamento aplicado foi monotônico crescente, com taxa de 2,5 MPa/min (figura 2) conforme[12].



Figura 2: Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.

Os valores de resistência ao cisalhamento, $f_{v0,T}$ (N/mm²) foram determinados para todos os corpos de prova, para cada nível de temperatura, considerando-se a máxima força aplicada no ensaio $F_{c0,máx}$ (N) e a área da seção transversal, A (mm²) imediatamente após o aquecimento, adotando-se a equação:

$$f_{v0,T} = \frac{F_{c0,máx}}{A} \quad (2)$$

3. RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 Teor de umidade, massa e densidade aparente em temperatura ambiente

Os corpos de prova de dimensões 2 x 3 x 5 (mm³) de angelim vermelho, acondicionados e secos ao ar, apresentaram um teor de umidade de 11,79% ± 0,17% e densidade aparente de 1125,85 kg/m³ ± 25,94 kg/m³. Os corpos de prova de dimensões 50 x 50 x 50 (mm³) acondicionados e secos ao ar, apresentaram massa de 139,92 g ± 2,81 g e densidade aparente de 1147,01 kg/m³ ± 82,98 kg/m³. Em [16] a mesma espécie apresenta uma densidade de 1170 kg/m³, a 12% de teor de umidade.

3.2 Massa e densidade aparente em temperatura elevada

Os corpos de prova de dimensões 50 x 50 x 50 (mm³) acondicionados nos diferentes níveis de temperaturas de 80 a 240°C apresentam a variação de massa conforme a figura 3.

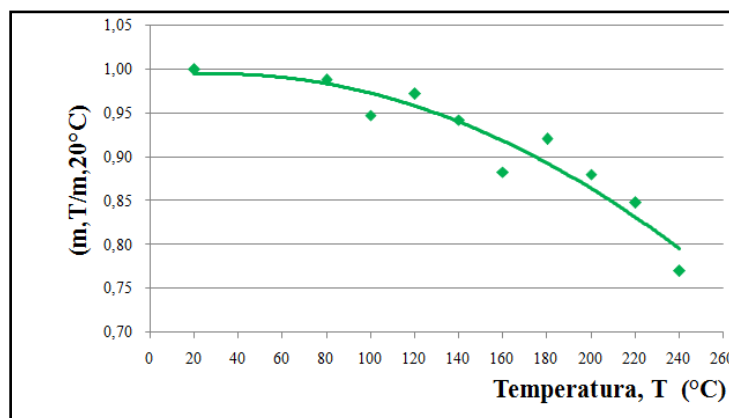


Figura 3: Massa relativa sob altas temperaturas.

Observa-se que a redução de massa acentua-se na temperatura de secagem da madeira como evidenciado na literatura técnica [4], [5], [6]. Os dados de massa utilizados para a conformação do gráfico da figura 3 foram normalizados em relação à massa média a 20°C ($m_T/m_{20^\circ C}$). A equação (3) representa esta relação em função do aumento de temperatura, com um coeficiente de correlação (R^2) de 0,911.

$$m_T/m_{20^\circ C} = 0,991 - 5,0 \times 10^{-6}T^2 \quad (3)$$

Os dados de densidade aparente normalizados em relação à densidade aparente média a 20°C ($d_{ap,T} / d_{ap, 20^\circ C}$) para corpos de prova acondicionados nos níveis de temperaturas de 80 a 240°C apresentaram uma variação de densidade aparente conforme a figura 4.

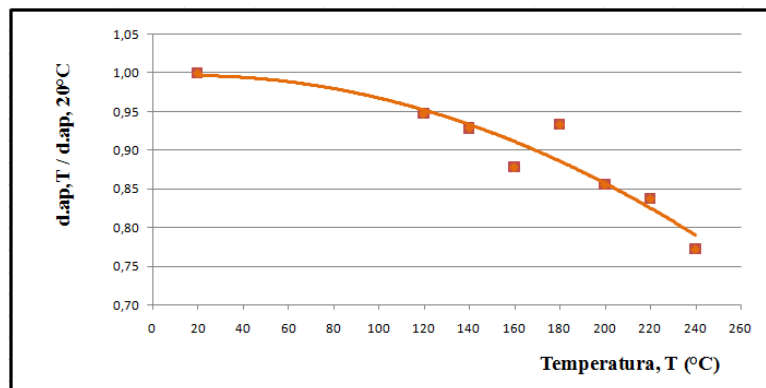


Figura 4: Densidade aparente relativa sob altas temperaturas.

A equação (4) representa esta relação em função do aumento de temperatura, com um coeficiente de correlação (R^2) de 0,896.

$$\rho_T/\rho_{20^\circ C} = 0,995 - 4,0 \cdot 10^{-6}T^2 \quad (4)$$

A acentuada redução de massa relativa e densidade aparente relativa a altas temperaturas é atribuível à eliminação da água de constituição e à degradação das cadeias poliméricas das hemiceluloses [3], [4], [5], [6], [7], [10] e degradação da lignina [11].

3.3 Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras

Para corpos de prova de dimensões 50 x 50 x 50 (mm³) acondicionados nos níveis de temperaturas na faixa de 20 a 240°C realizou-se a análise estatística dos dados de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. Para verificação da significância dos dados obtidos aplicou-se o teste de normalidade Anderson-Darling. O teste indicou que os dados de resistência obtidos para cada temperatura são provenientes de uma mesma população normal não sendo detectado nenhum dado disperso no nível de significância 5% (figura 5).

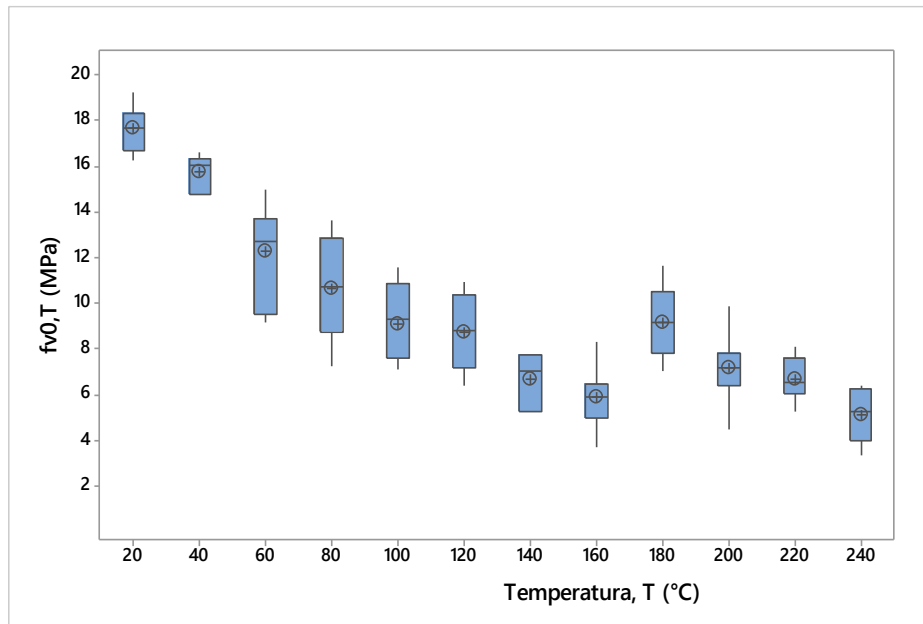


Figura 5: Distribuição das amostras de dados de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em altas temperaturas.

Os dados de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras normalizados em relação ao valor médio de resistência ao cisalhamento a 20°C ($f_{v0,T}/f_{v0,20°C}$) apresentaram variação conforme a figura 6.

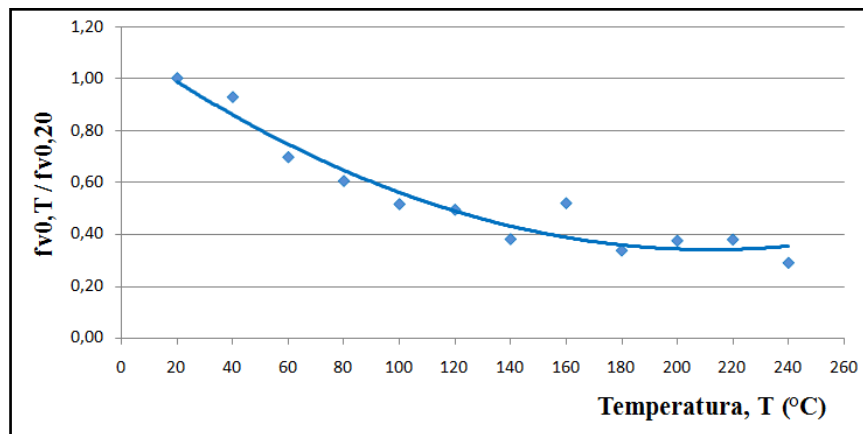


Figura 6: Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras relativa sob altas temperaturas.

A curva apresentada na figura 6 reflete a relação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras relativa em função do aumento de temperatura, com um coeficiente de correlação (R^2) de 0,934 conforme a equação (5):

$$f_{v0,T}/f_{v0,20°C} = 1,129 - 0,007 \cdot T + 2,0 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \quad (5)$$

O gráfico da figura 7 apresenta resultados de resistência relativa ao cisalhamento paralelo às fibras determinados neste trabalho para a espécie de angelim vermelho comparados com resultados de diferentes autores: *Schizolobium amazonicum* pesquisado por [8] e *eucalyptus saligna* e *pinus taeda* pesquisados por [10].

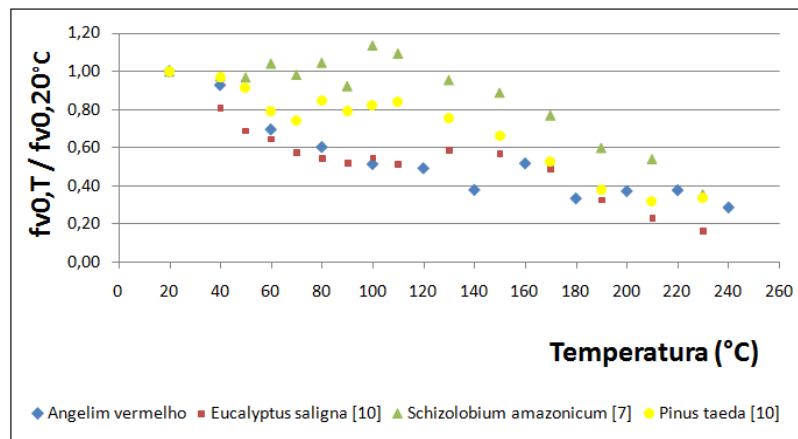


Figura 6: Influência do aumento de temperatura na resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em diferentes espécies de madeira.

A análise dos dados de resistência da madeira de angelim vermelho apresentados no gráfico da figura 6 indica que a resistência diminui acentuadamente até a temperatura de 150°C seguida de um relativo aumento de resistência ao atingir a temperatura no intervalo de transição vítrea (T_g) da madeira como mencionado em [3] e [11] a partir da qual a resistência cai acentuadamente. Observa-se que as amostras de angelim vermelho com densidade média aparente de 1125,85 kg/m³ e o *Eucalyptus saligna* com densidade média aparente de 745 kg/m³ apresentam um comportamento bem aproximado no intervalo de 40 a 100°C. As amostras de *Pinus taeda* e de *Schizolobium amazonicum* com densidade média aparente de 423 kg/m³ e 368 kg/m³ respectivamente, por sua vez, no intervalo de 40 a 150°C apresentam comportamento com elevação relativa de resistência. Os valores de resistência do Angelim vermelho na faixa de 20 a 40°C apresentam um coeficiente de variação médio de 6,98% e na faixa de 60 a 240°C um coeficiente de variação médio de 20,35%. Segundo [10] constatou-se para o *Eucalyptus saligna* que a menor dispersão foi de 4,7% a 90°C e a maior foi de 26,2% a 190°C. Tanto para o angelim vermelho quanto para o *Eucalyptus saligna* observa-se uma redução de cerca de 50% na resistência ao cisalhamento na temperatura de 100°C. De forma geral a análise da figura 6 evidencia que o comportamento da madeira em função do aumento da temperatura é influenciado pela sua densidade e esta constatação é corroborada no trabalho desenvolvido em [13].

4. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o efeito de altas temperaturas na resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira da espécie de angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Duke) submetidas a temperaturas no intervalo de 20 a 240°C. A redução de massa acentua-se na temperatura de secagem da madeira observando-se uma tendência de mudanças nas curvas de massa relativa e densidade aparente relativa nas temperaturas de 100°C e 160°C atribuível à degradação das cadeias poliméricas das hemiceluloses e à eliminação da água de constituição, respectivamente. Em consequência observa-se que a resistência diminui acentuadamente até a temperatura de 150°C seguida de um relativo aumento de resistência ao atingir a temperatura no intervalo de transição vítrea (T_g) da madeira a partir da qual a resistência cai acentuadamente. Determinou-se uma redução de cerca de 50% na resistência ao cisalhamento na temperatura de 100°C alcançando redução de até 85% a 240°C. Segundo [10] as diferenças de comportamento entre o *Pinus taeda* e o *Eucalyptus saligna* podem ser devidas às diferenças anatômicas entre existentes resinosas e folhosas e também entre a lignina que está na lamela média e na parede celular. Ainda segundo [10] entre 70 °C e 130 °C ocorre uma forte redução da resistência do eucalyptus saligna que poderia ser devida à transição vítrea da lignina, polímero que

apresenta transição vítrea em sua estrutura entre 100 °C e 130 °C. Comparando-se com o comportamento de outras espécies de densidades diferentes pode-se deduzir que o comportamento da madeira sujeita a elevação de temperatura encontra-se relacionado aos componentes químicos presentes nas paredes celulares e às densidades das madeiras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG e à CAPES pelo apoio no desenvolvimento dos trabalhos.

REFERÊNCIAS

- [1] Tannert, T.; Müller, A.; Vallée, T. The future of quality control for wood & wood products. Cost Action E53. Edinburgh. (2010).
- [2] Bodig, J, Jayne, B. A. Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold, - 172 p.(1982).
- [3] Canevarolo Jr., S. V. (2006). Ciência dos polímeros. Um curso básico para tecnólogos e engenheiros. São Paulo: Artliber Editora Ltda. 2ª Ed. 280p.
- [4] Kretschmann (2010) KRETSCHMANN, D. Wood Handbook, Chapter 05: Mechanical Properties of Wood. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 5-1 - 5-46. Chapter 5. 2010
- [5] Manriquez, M. J.; Moraes, P. D.; Maestri, F. A. Temperature and moisture content effects on compressive strength parallel to the grain of paricá. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 15, n. 1, p. 17-27, jan./mar. (2015).
- [6] Brito, J. O. Estudo das influências da temperatura, taxa de aquecimento e densidade da madeira de Eucalyptus maculata e Eucalyptus citriodora sobre os resíduos sólidos da pirólise. [Tese]. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo (1992).
- [7] Manriquez, M J; Moraes, P D. Wood behaviour at high temperatures. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 157-174. (2009).
- [8] Manriquez, M. J. Influência da Temperatura sobre as Propriedades Mecânicas do Paricá. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis(2008).
- [9] White, R. H.; Woeste, F.E. Structural Performance: performance issues relative to extreme events. Post-Fire Analysis of Solid-Sawn Heavy Timber Beams. Structure Magazine. P. 38-40. Forest Products Laboratory, Madison, WI. (2013).
- [10] Manriquez, M. J. Coeficientes de modificação das propriedades mecânicas da madeira devidos à temperatura [tese] 259 p.– Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (2012).
- [11] Brito, J. O.; Garcia, J. N.; Bortoletto, G.; Pessoa, A. M. C.; Silva, P. H. M. Densidade básica e retratibilidade da madeira de Eucalyptus grandis, submetida a diferentes temperaturas de Termorreificação. CERNE, vol. 12, núm. 2, abril-junho, 2006, pp. 182-188, Universidade Federal de Lavras. Brasil.
- [12] Grobério, M. P.; Lahr, F. A. R. Indicações para o emprego da madeira de espécies tropicais do Brasil. MADEIRA: arquitetura e engenharia, ano 3, n.8, quadrimestral maio/ago, ISSN 1516-2850 (2002).
- [13] Nahuz A. R. Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil / São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2013).
- [14] Dhima, D.; Audebert, M.; Racher, P.; Bouchair, A.; Taazount, M. Shear tests of glulam at elevated temperatures. FIRE AND MATERIALS. Fire Mater 38:827–842 (2014).
- [15] BS 373. British Standard. Methods of testing small clear specimens of timber (1957).
- [16] ABNT NBR 7190. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, Brasil (1997).