colloquium exactarum

COMPRESSÃO AXIAL EM PEÇAS DE MADEIRA: ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE PEÇAS ESTRUTURAIS DE MADEIRA REVESTIDAS COM RESINA POLI-URETANA SUBMETIDAS À COMPRESSÃO AXIAL

AXIAL COMPRESSION ON TIMBER PARTS: ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF WOOD STRUCTURAL PARTS COATED WITH POLY-URETAN RESIN UNDER AXIAL COMPRESSION

Adriano Seidi Demarchi Mikami[1]; Caíque Rafael de Macena Oliveira[1]; Larissa Queiroz Minillo[2]

[1] Discentes da Universidade do Oeste Paulista. [2] Docente da Universidade do Oeste Paulista.
e-mail: adriano.mikami@yahoo.com.br; rrcaique@gmail.com; larissaminillo@gmail.com ;

RESUMO – Este estudo consiste na comparação do comportamento de peças estruturais de madeira *in natura* com peças estruturais tratadas com resina poliuretana à base de óleo de mamona em relação à resistência à compressão axial. O tratamento intenta melhorar o comportamento mecânico da madeira e, para tal, serão comparadas madeiras de Pinus e Eucalipto. Serão realizadas avaliações de acordo com a NBR 7190 (1997) visando caracterizar as propriedades físicas e mecânicas das peças de madeira e os resultados obtidos foram submetidos à análise estatística pelos métodos Anova e Regressão Linear.
Palavras-chave: madeira estrutural; compressão axial; resina poliuretana.

ABSTRACT – This study relies on comparing the behavior of structural timber pieces *in natura* with pieces treated with castor oil-based polyurethane resin, with regard to the resistance to axial compression. The treatment attempts to improve the mechanical behavior of the wood and, to this end, two species will be compared: Pinus and Eucalyptus. Evaluations will be carried out according to NBR 7190 (1997) aiming to characterize physical and mechanical properties of the pieces and the results will be submitted to the statistical analysis by the Anova and Linear Regression methods.
***Keywords*:** structural wood; axial compression; polyurethane resin.

Recebido em: 19/04/2018
Revisado em: 01/08/2018
Aprovado em: 11/09/2018

1. INTRODUÇÃO

A madeira já foi muito utilizada estruturalmente pelo mundo todo, porém seu uso perdeu lugar para o concreto armado devido a vários fatores, dentre eles a não-uniformidade do material (gerando descontinuidade de resistência) e também sua curta vida útil caso não seja tratada, necessitando de manutenções regulares devido a ataques químicos, físicos e biológicos, principalmente de insetos.

Atualmente, com a necessidade de materiais sustentáveis e o desenvolvimento de tecnologias para preservação de madeiras, seu uso vem novamente se tornando notável, com execução de vigas, pilares e lajes em forma de Madeira Laminada Colada (MLC), Madeira Laminada Cruzada (CLT) e Painéis de Tiras de Madeira Orientadas (OSB) (FERRO, 2013).

Todos esses derivados são colados e/ou tratados com algum preservativo em específico, sendo citado por exemplo:

• Arseniato de Cobre Cromado (CCA), que apesar da eficiência contra intemperes e à lixiviação, é muito tóxico devido ao cromo e ao arsênio. Esse tipo de tratamento pode ser usado em postes, dormentes e fundanções em contato com solo e umidade, conferindo a eles cor esverdeada.

• Borato de Cobre Cromado (CCB), alternativa ao CCA onde o arsênio é substituído pelo cobre buscando menor toxidade. Apesar de alto índice de eficiência e menor toxidade, sua durabilidade em contato com umidade é restrita, devido à alta solubilidade do cobre.

Segundo Lahr *et al.* (2014) os preservativos de origem sintética são os mais usados atualmente, devido à melhor adesão e melhor resistência ao ataque de micro-organismos quando comparados com adesivos de fontes naturais. A maioria dos preservativos usados na indústria de laminados possuem formaldeído na composição, que é prejudicial ao meio ambiente e aos seres humanos. Além disso, esses adesivos requerem uma alta temperatura de cura, acima de 160°C, o que gera um alto consumo de energia.

Com a tendência mundial de uso de produtos biodegradáveis, não poluentes e vindos de fontes renováveis (diferente dos exemplos acima), muitos investimentos estão sendo feitos em pesquisas que possam gerar adesivos livres de formaldeído, porém com a mesma eficiência. Um exemplo de resultado é a resina poliuretana à base de mamona, criado no Instituto de Química de São Carlos – USP. A semente de mamona, *Ricinus communis*, pode ser extraída com facilidade em escala industrial, uma vez que a planta ocorre em todo território nacional e não apresenta dificuldades de cultivo.

O objetivo desse trabalho é verificar se existe alguma adição na resistência mecânica à compressão de corpos de prova feitos de madeira e revestidos com essa resina. Sabe-se que em diferentes aplicações, como o MLC por exemplo, a resistência é majorada. Através dessa pesquisa será possível descobrir se o mesmo acontece em peças maciças.

Portanto, o principal objetivo deste trabalho é avaliar o potencial uso da resina como tratamento das peças de madeira, tornando-as mais resistentes. Para tal, propôs-se comparar os ensaios mecânicos de compressão de corpos de provas submetidos ao tratamento, aos dos corpos de prova sem tratamento, e por fim, utilizando-se gráficos e métodos estatísticos, analisar o comportamento das peças quanto à solicitação de compressão.

2. JUSTIFICATIVA

A resina poliuretana à base de óleo de mamona fornece uma ligação extremamente resistente e similar à encontrada entre as fibras da madeira em estado natural, a *lignina*, portanto há a possibilidade de melhoramento nas ligações internas da madeira.

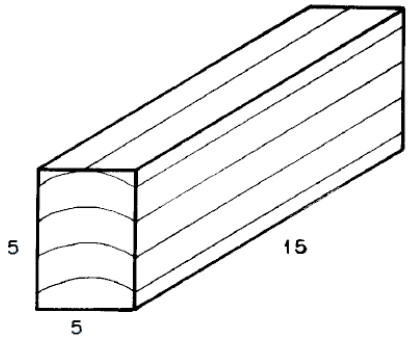
Espera-se que a madeira absorva a resina poliuretana, que leva o óleo de mamona como catalisador, tornando suas

fibras mais rígidas e resistentes à compressão. O interesse no melhoramento da resistência à compressão da madeira está na possibilidade a produção de pilares mais esbeltos sem perda de capacidade. Segundo Miotto (2009) a redução da disponibilidade de madeira e a consequente necessidade de racionalização de seu uso, nos forçam a buscar novas estratégias estruturais que preservem a estética, aumentem o desempenho e reduzam seu uso.

3. MÉTODO

A metodologia utilizada no presente trabalho é a investigação por ensaios laboratoriais e foram realizados ensaios de compressão axial paralela às fibras, previsto na norma NBR 7190 (1997) utilizando a prensa mecânica disponível no Laboratório de Engenharia Civil da UNOESTE.

Figura 1. Dimensões do CP para ensaio de compressão paralela à fibra



Fonte: NBR 7190 (1997)

Foram serrados 20 corpos de prova (CP) de madeira *in natura*, de dimensões previstas na norma do ensaio (Figura 1) de 15x5x5cm, dos quais 10 corpos de prova receberam pintura de resina poliuretana e 10 serão testados sem nenhum tratamento. O mesmo foi feito tanto para a madeira de Pinus quanto para madeira de Eucalipto.

Figura 2. CP 1A- grupo Eucalipto-PU, detalhe do nó ao pé do CP



Fonte: Autores

Segundo Miotto (2009) a melhor opção é colar madeiras com umidade abaixo da umidade de equilíbrio esperada e em condições que mantenham o teor de umidade da madeira abaixo de 22%. Em laboratório a temperatura média foi de 21°C durante os ensaios e a umidade dos corpos de prova se manteve estável à 9%, obtida através de ensaio de umidade segundo a NBR 7190 (1997).

Os corpos foram nomeados alfanumericamente, sendo de 1A (Figura 2) á 1L os corpos de prova tratados Eucalipto (grupo Eucalipto-PU), e de 1H a 1T os não tratados (grupo Eucalipto-Controle), e 2A a 2L, os corpos de Pinus tratados (grupo Pinus-PU), e 2H a 2T os não tratados (grupo Pinus-controle).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As tabelas 1 e 2 apresentam a densidade (ρ) com seu desvio padrão médio antes e depois do tratamento por pintura para os corpos de prova de madeira de Eucalipto.

Tabela 1. Pesos específicos (ρ) do grupo Eucalipto-PU

CP	ρ (g/cm³)	Desvio Padrão	ρ após pintura (g/cm³)	Desvio Padrão
1A	0,601	0,024	0,615	0,023
1B	0,570		0,582	
1C	0,593		0,605	
1D	0,617		0,631	
1E	0,607		0,621	
1F	0,556		0,572	
1G	0,552		0,570	
1H	0,618		0,633	
1I	0,545		0,563	
1J	0,571		0,584	

Fonte: Autores

Tabela 2. Pesos específicos (ρ) do grupo Eucalipto-controle

CP	ρ (g/cm³)	Desvio Padrão
1K	0,599	0,025
1L	0,573	
1M	0,550	
1N	0,611	
1O	0,546	
1P	0,632	
1Q	0,590	
1R	0,571	
1S	0,628	
1T	0,608	

Fonte: Autores

As tabelas 3 e 4 apresentam a densidade (ρ) com seu desvio padrão médio antes e depois do tratamento por pintura para os corpos de prova de madeira de Eucalipto.

Tabela 3. Pesos específicos (ρ) do grupo Pinus-PU

CP	ρ (g/cm³)	Desvio Padrão	ρ após pintura (g/cm³)	Desvio Padrão
2A	0,403	0,007	0,427	0,008
2B	0,39		0,412	
2C	0,393		0,414	
2D	0,408		0,427	
2E	0,41		0,435	
2F	0,404		0,432	
2G	0,423		0,438	
2H	0,4		0,419	
2I	0,395		0,414	
2J	0,41		0,427	

Fonte: Autores

Tabela 4. Pesos específicos (ρ) do grupo Pinus-Controle

CP	ρ (g/cm³)	Desvio Padrão
2K	0,441	0,011
2L	0,426	
2M	0,416	
2N	0,388	
2O	0,408	
2P	0,414	
2Q	0,406	
2R	0,411	
2S	0,395	
2T	0,423	

Fonte: Autores

Após período de cura da resina de 24 horas, foram realizados os ensaios de compressão axial em laboratório e os valores obtidos de tensões de ruptura foram agrupados nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5. Tensão de ruptura do grupo Eucalipto-controle e Eucalipto-PU

CP	Tensão de Ruptura (MPa)	Desvio Padrão
1A	33,355	2,541
1B	46,084	
1C	42,853	
1D	44,770	
1E	47,949	
1F	45,813	
1G	42,058	
1H	44,951	
1I	42,932	
1J	43,994	
1K	45,656	4,192
1L	46,793	
1M	47,530	
1N	52,575	
1O	47,628	
1P	37,322	
1Q	46,095	
1R	45,986	
1S	36,617	
1T	38,518	

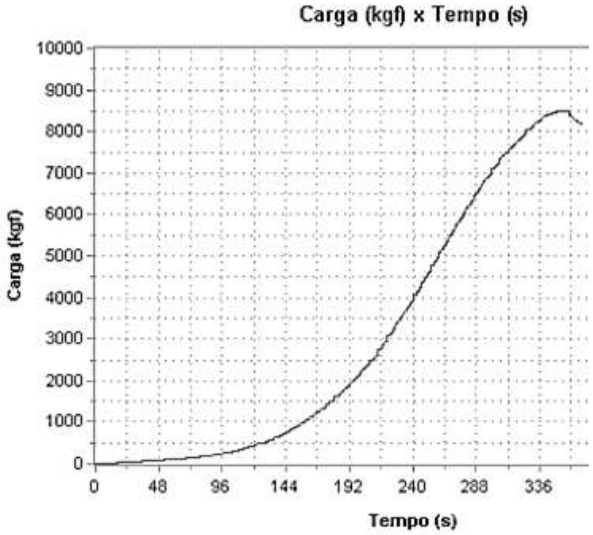
Fonte: Autores

Tabela 6. Tensão de ruptura do grupo Pinus-controle e Pinus-PU

CP	Tensão de Ruptura (MPa)	Desvio Padrão
2A	23,285	1,537
2B	20,815	
2C	23,924	
2D	23,708	
2E	22,477	
2F	22,673	
2G	31,681	
2H	23,743	
2I	23,700	
2J	23,951	
2K	21,043	0,982
2L	23,783	
2M	23,818	
2N	21,964	
2O	24,284	
2P	22,873	
2Q	24,151	
2R	22,332	
2S	24,547	
2T	24,010	

Os diagramas carga (kgf) pelo tempo (s) que são gerados pela prensa hidráulica mostram o tipo de ruptura que o CP apresentou, bem como sua fase elástica e sua fase plástica. A figura 3 apresenta o diagrama carga x tempo do CP 1A, que apresenta nó e recebeu tratamento com a resina PU mamona, nota-se em deu diagrama que sua ruptura foi pouco dúctil, ou seja, apresentou características de ruptura frágil, este efeito se dá pela presença do nó na madeira que reduz sua capacidade resistiva devido a diferença de densidade entre as fibras do nó e da madeira.

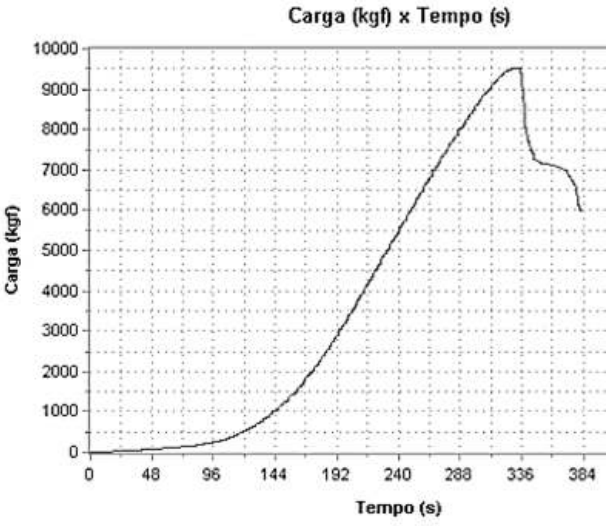
Figura 3. Ensaio CP 1A - grupo PU – Com defeito (nó)



Fonte: Autores

A ruptura frágil também é observada em CPs do grupo controle, ou seja, sem pintura de resina PU mamona e com defeito do tipo nó (Figura 4), evidenciando que a pintura não modificou o tipo de ruptura de corpos de prova com defeitos.

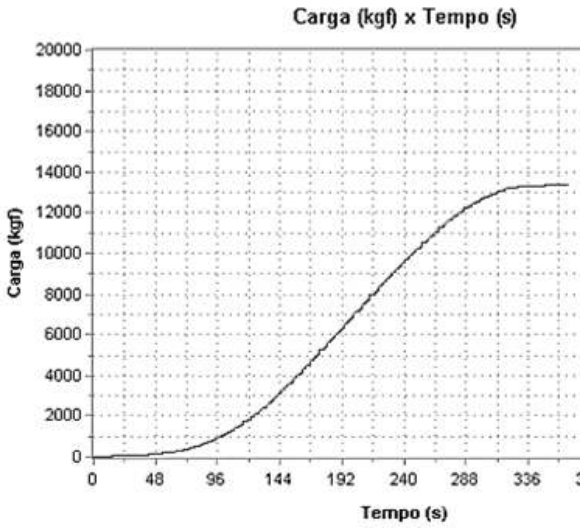
Figura 4. Ensaio CP 1P - Grupo controle – Com defeito (nó)



Fonte: Autores

Já Figura 5 apresenta o diagrama carga versus tempo do CP 1N, feito com madeira de eucalipto e sem defeitos, sem tratamento com resina PU mamona e apresenta ruptura dúctil, comum as madeiras deste tipo.

Figura 5 – Ensaio CP 1N- Sem defeito



Fonte: Autores

Os resultados de resistência foram submetidos a análise Anova resultando na constatação que a diferença entre os resultados dos dois grupos não são significativamente diferentes entre si (Valor-P<0,05), portanto não houve ganho de resistência através do tratamento, tanto para a madeira de Eucalipto (Quadro 1) quanto de Pinus (Quadro 2).

Quadro 1. Analise Anova entre os resultados de resistência à compressão do grupo PU em relação ao grupo controle

RESUMO

Grupo	*Soma*	*Média*	*Variância*
Eucalipto-controle	444,7201	44,47201	27,21787
Eucalipto-PU	434,7594	43,47594	15,72391

ANOVA

Fonte da variação	*gl*	*MQ*	*F*	*valor-P*
Entre grupos	1	4,960797	0,231048	0,636539
Dentro dos grupos	18	21,47089		

Fonte: Autores

Quadro 2. Analise Anova entre os resultados de resistência à compressão do grupo Pinus-PU em relação ao grupo Pinus-controle

RESUMO

Grupo	*Soma*	*Média*	*Variância*
Pinus-controle	232,8049	23,28049	1,361147
Pinus-PU	239,9589	23,99589	8,220741

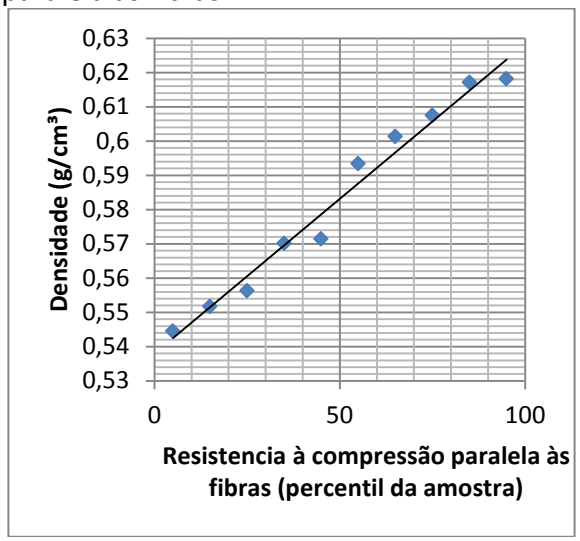
ANOVA

Fonte da variação	*gl*	*MQ*	*F*	*valor-P*
Entre grupos	1	2,558986	0,53413	0,474282
Dentro dos grupos	18	4,790944		

Fonte: Autores

Analisando a relação entre a Densidade e Resistência à compressão da madeira pelo método da regressão linear (figura 6) nota-se que esta é diretamente proporcional, tanto para o grupo controle quanto para o grupo PU. A correlação entre densidade e resistência à compressão da madeira é um resultado já esperado devido a resultados anteriores da literatura.

Figura 6. Regressão linear dos resultados e reta da correlação entre os parâmetros Densidade e Resistencia à compressão paralela às fibras.



Fonte: Autores

A madeira de Eucalipto é a mais densa dentre as duas estudadas, portanto tende a absorver menor quantidade de resina poliuretana. Através dos resultados de densidade é possível comprovar esta tendência, pois a densidade média antes e após a aplicação da resina mostra acréscimo de 2,5% para madeira de eucalipto e 5,18% para madeira de Pinus, portanto a madeira de pinus absorveu, em média, 2,67% de resina a mais do que a madeira de eucalipto.

Tabela 7. Tensão de ruptura do grupo Pinus-controle e Pinus-PU

	ρ médio (g/cm³)	**ρ médio após pintura (g/cm³)**	**Δρ médio (g/cm³)**	**%**
Eucalipto	0,5830	0,5976	0,0146	2,50
Pinus	0,4036	0,4245	0,0209	5,18

Fonte: Autores

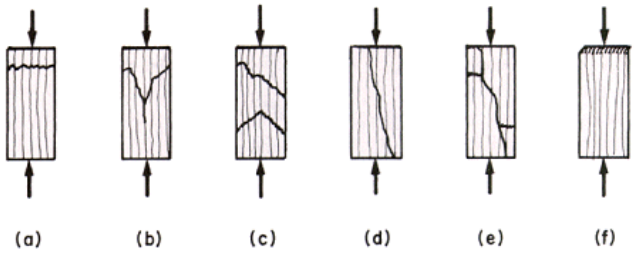
Quanto à linha de ruptura da madeira, obteve-se em maior quantidade a ruptura tipo A e a tipo f (figura 7), para a madeira de pinus e de eucalipto, não se obtendo diferença entre os tipos de linha de ruptura no grupo que recebeu tratamento de PU mamona.

Figura 7. CP rompido com sua linha de ruptura proeminente.



Fonte: Autores

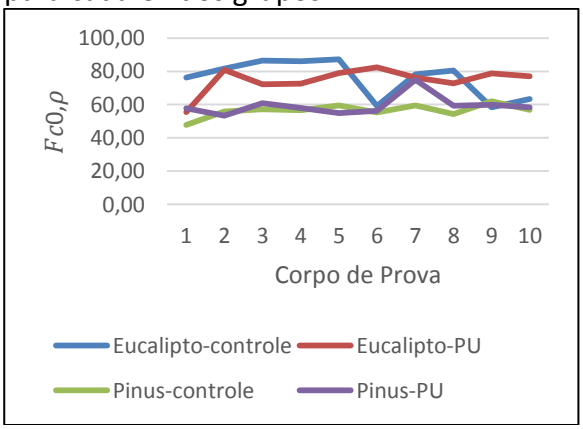
Figura 8. Tipos de ruptura dos corpos de prova de madeira



Para uma melhor analise da diferença entre resistência dos corpos de prova dos grupos analisados, foi feita a comparação da relação Resistencia à compressão paralela à fibra ($Fc0°$) por Densidade (ρ), afim de se eliminar o efeito da densidade na resistência final da madeira.

$$Fc0,\rho = \frac{Fc0°}{\rho}$$

Figura 9. Gráfico comparativo entre $Fc0,\rho$ para cada CP dos grupos



Fonte: Autores

Nota-se pelo gráfico da Figura 9 que os resultados de resistência dos grupos Pinus-controle e Pinus-PU se mantem estáveis, ou seja, todos os corpos de prova se mantiveram próximos a média, isso se dá pela ausência de nós nos corpos de prova de Pinus.

Já os corpos de prova de madeira de Eucalipto mostram-se com grande variação para o grupo controle e pequena variação de resistência para o grupo PU. Esta pequena variação de resistência em torno da média se dá pelo fato de que a resina preenchia os defeitos da madeira, como os nós e fissuras, tornando assim o CP mais resistente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se concluir que, em ambas as madeiras o processo de pintura com resina poliuretana não apresenta benefícios quanto ao aumento de resistência à ruptura por compressão axial. Isso se deve ao fato de que a absorção da resina pela madeira foi bastante superficial, não sendo suficiente para causar alterações significativas nos resultados de resistência. Já para madeiras com defeitos nas faces da seção transversal apresentou melhores resultados de resistência em comparação a madeira sem defeitos. Sugere-se para estudos posteriores a obtenção de um método para melhor absorção da resina pela madeira, ou seja, que absorção de fluído pelos tecidos de madeira possa ser maior, aumentando assim as possibilidades do ganho de resistência mecânica, modificando os corpos de prova, o modo de aplicação da resina ou a fluidez da resina.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

FERRO, F. S. **Painéis OSB com madeira Schizolobium amazonicum e resina poliuretana à base de óleo de mamona**: viabilidade técnica de produção. 2013. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/8

8131/tde-12042013-215053/en.php>. Acesso em: 11 jun. 2018.

LAHR, F. A. R. et al. **Mechanical properties of particleboards manufactured with Schizolobium amazonicum and castor oil based polyurethane resin**: influence of proportion polyol/pre-polymer. 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/260789168_Mechanical_properties_of_particleboards_manufactured_with_Schizolobium_amazonicum_and_castor_oil_based_polyurethane_resin_influence_of_proportion_polyolpre-polymer>. Acesso em: 11 jun. 2018.

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto**: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro. 2009. 357 p. Teste (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.