



AValiação DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE PAREDES DE MADEIRA LAMINADA COLADA

STRUCTURAL PERFORMANCE EVALUATION OF GLUED LAMINATED TIMBER WALLS

Carrasco, E. V. M ^{(1)*}; Bremer, C. F. ⁽²⁾; Mantilla, J. N. R. ⁽³⁾

⁽¹⁾ Professor Doctor, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG, Brasil

⁽²⁾ Profesora Doctora, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG, Brasil

⁽³⁾ Profesora Doctora, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG, Brasil

* Contacto: mantilla.carrasco@gmail.com

CÓDIGO: 4619561

Resumen

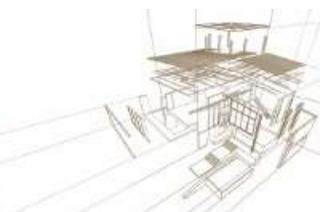
O objetivo deste trabalho é determinar o desempenho estrutural de paredes de madeira laminada colada utilizando a norma brasileira NBR 15575. Foram confeccionadas 5 paredes com seção transversal de 9 cm x 140 cm e altura de 260 cm, sendo 3 paredes de *Eucalyptus cloeziana* e 2 de *Eucalyptus grandis*. O adesivo utilizado foi a base de resina resorcinol formaldeído. Antes da realização dos ensaios foi feita uma caracterização física e mecânica da madeira. As paredes foram montadas a partir da união de 5 vigas de madeira laminada colada de 52 cm de comprimento. A união foi por meio do sistema macho-fêmea utilizando adesivo. Foram realizados os ensaios de compressão simples, corpo mole e corpo duro, conforme especificações da NBR 15575. As condições de contorno foram fixas nas duas extremidades. A instrumentação foi constituída de uma célula de carga e 3 transdutores de deslocamento. A aplicação da carga foi monotônica até atingir a carga máxima estipulada. Os resultados dos ensaios de compressão simples indicam o elevado desempenho estrutural da parede de madeira laminada colada atendendo às especificações da NBR 15575. Nos ensaios de corpo mole e corpo duro as paredes também atenderam aos critérios de desempenho especificados pela NBR 15575.

Palabras-clave: madeira laminada colada, parede, avaliação da conformidade.

Abstract

The objective of this work is to determine the structural performance of glued laminated timber walls using the Brazilian standard NBR 15575. Five walls with cross-section of 9 cm x 140 cm and height of 260 cm were made, 3 of these walls of *Eucalyptus cloeziana* and 2 of *Eucalyptus grandis*. The adhesive used was resorcinol formaldehyde resin base. A physical and mechanical characterization of the wood was performed before the tests. The walls were assembled from the union of 5 beams of glued laminated timber of 52 cm in length. The union was made through the male-female system using adhesive. Simple compression, soft body and hard body impact tests were performed, according to the specifications of NBR 15575. The boundary conditions were fixed at both ends. The instrumentation consisted of a load cell and 3 displacement transducers. The load application was monotonic until reaching the stipulated maximum load. The results of the simple compression tests indicate the high structural performance of the glued laminated timber wall, meeting the specifications of NBR 15575. In the soft body and hard body impact tests, the walls also met the performance criteria specified by NBR 15575.

Keywords: glued laminated timber, wall, performance evaluation.



1. INTRODUCCIÓN

O surgimento dos painéis de madeira ocorreu com o isolamento da Alemanha durante a Segunda Guerra Mundial, quando o país se viu diante de dificuldades que fomentaram o surgimento de novas tecnologias. Uma delas foi o desenvolvimento de painéis de madeira aglomerada, na década de 1940, como forma de empregar os resíduos madeireiros disponíveis, em um cenário de escassez de madeira com características compatíveis com a produção dos compensados (Iwakiri, S., 2005 *apud* Macedo, L. B., *et al*, 2015). A partir da década de 1980, as indústrias de base florestal no Brasil passaram por uma grande transformação em termos de matéria-prima, produtos e processos produtivos. A base da matéria-prima madeira, que era quase que totalmente oriunda de florestas nativas, passou a ser substituída por florestas plantadas de rápido crescimento, especialmente a de pinus e eucalipto. (ABIMCI, 2004 *apud* Iwakiri, S. *et al*, 2008).

O compensado estrutural é classificado como um painel multilaminado, colado com resinas à prova d'água, destinadas a uso em condições cíclicas de alta e baixa umidade relativa, eventualmente em ação direta com a água, de uso exterior. A sua aplicação se destina principalmente ao setor de construção civil e para embalagens (BALDWIN, 1995 *apud* Iwakiri, S. *et al*, 2008).

O painel de Oriented Strand Board (OSB) é reconstituído de flocos de madeira, parcialmente orientados, com a incorporação de adesivo à prova d'água e consolidados por meio de prensagem a quente. As chapas de OSB são produtos utilizados para aplicações estruturais, como suportes de piso e forro, componentes de vigas, estrutura de móveis e embalagens, competindo com o compensado estrutural. Por ser menos exigente do que o compensado na qualidade da matéria prima, o OSB está substituindo o mesmo em muitas aplicações (CLOUTIER, 1998 *apud* Cabral, C. P. T. *et al*, 2006).

Os painéis de madeira laminada colada cruzada (MLCC), ou painéis CLT (cross laminated timber) são formados por lâminas de madeira com grandes dimensões arranjadas ortogonalmente e unidas com adesivo estrutural sob alta pressão. O sistema de laminação cruzada possibilita ao CLT trabalhar como um elemento estrutural rígido e autoportante (Amorim, S. T. A. A *et al*, 2017).

Caso as lâminas sejam dispostas paralelamente umas às outras tem-se a madeira laminada colada (MLC), fabricada a partir de pequenas placas de madeira planas ou lamelas coladas com adesivos estruturais. É capaz de formar peças maiores com propriedades mecânicas que são mais resistentes que as tábuas de madeira originais. O material pode ter uma disposição homogênea, onde todas as laminações são da mesma classe de resistência, ou combinadas, onde as laminações externas são de uma classe de maior resistência. A MLC pode compor vigas estruturais, colunas, elementos de treliça ou paredes estruturais (Building and Construction Authority, 2018).

A norma brasileira de Desempenho, NBR15575, nas suas partes 2 e 4, traz os requisitos necessários para os sistemas de vedações internas e externas das edificações habitacionais. Nelas são descritos os níveis de aceitação, conforme os resultados dos ensaios realizados (deslocamentos, fissuras e falhas). São previstos ensaios de compressão, corpo mole, corpo duro. A modelagem matemática do comportamento conjunto para a resistência mínima de projeto prevê ensaios destrutivos, com pelo menos dez etapas de carga, com repetição para 3 modelos geométricos idênticos em escala real e com traçado de diagramas carga x deslocamento.

Neste trabalho foram analisadas paredes de MLC, formadas por vigas empilhadas, conectadas entre si por encaixes macho-fêmea, sob as premissas da NBR15575 (2013). Foram realizados os ensaios de compressão simples, corpo mole e corpo duro.



2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada nos ensaios dos elementos estruturais foi orientada por normas nacionais brasileiras. Os ensaios dos protótipos foram realizados no LAEES – Laboratório de Análise Experimental de Estruturas. Os ensaios de caracterização mecânica da madeira foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos - LACAM. Os ensaios de caracterização física foram realizados no Laboratório de Caracterização Física - LACAF. Todos estes laboratórios são pertencentes ao Departamento de Engenharia de Estruturas – DEES – da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.

2.1. Detalhes da fabricação das paredes de MLC

A espessura das lâminas utilizadas na fabricação de elementos estruturais de MLC variou em torno de 2,5 cm. As emendas longitudinais utilizadas foram do tipo *finger joint*, permitindo aumentar os comprimentos das peças e um maior aproveitamento da madeira por meio da eliminação de defeitos. As dimensões destes entalhes variaram em função da espessura da lâmina adotada na fabricação das peças de MLC. Foi utilizado o adesivo estrutural resistente à umidade à base de resorcinol Cascophen RS 216, (fabricado pela Borden Química Ltda), com tempo de pega de aproximadamente 1 hora. Cuidado especial foi dado à preparação da superfície das lâminas antes da aplicação do adesivo. Para se obter a máxima resistência da linha adesiva, as superfícies das lâminas foram preparadas de forma a se ajustarem com perfeição. Observou-se que madeiras de elevadas densidades requerem menos adesivo que as espécies de baixa densidade ou porosas. As lâminas receberam o adesivo em suas superfícies e depois foram levadas às prensas.

Cada parede de MLC foi constituída por 5 placas, com as dimensões e ligações tipo macho-fêmea, apresentadas na Figura 1.

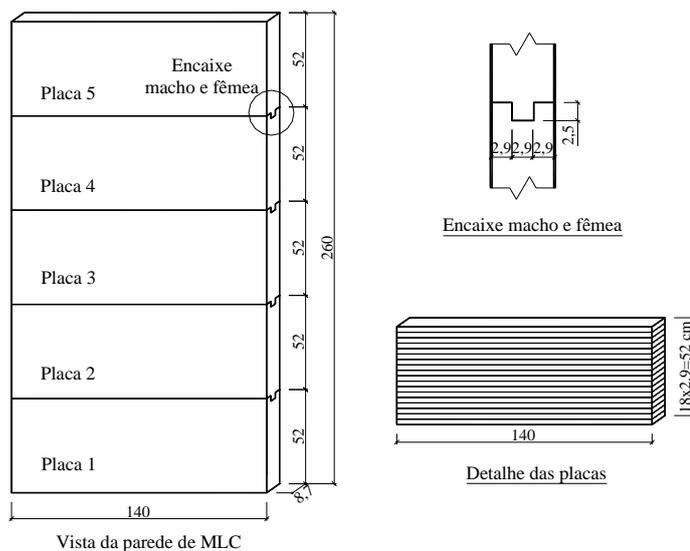
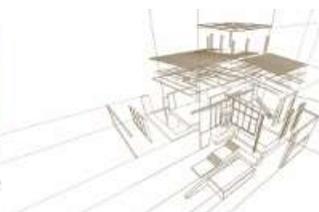


Figura 1: Paredes de MLC

2.2. Ensaios realizados

2.2.1. Caracterização física e mecânica da madeira



Foi feita uma caracterização física e mecânica da madeira, segundo os preceitos da NBR7190 (1997) - Projeto de Estruturas de madeira.

2.2.2. Ensaios nas paredes de MLC

A Norma ABNT 15575-4 (2013) traz em seu texto a recomendação de que painéis estruturais pré-fabricados devam ser ensaiados nas mesmas condições do emprego em obra, com altura prevista para o pé-direito e largura mínima de 1,20m ou de 5 vezes a espessura, para paredes monolíticas. São previstos por esta norma ensaios de compressão, corpo mole e corpo duro. A modelagem matemática do comportamento conjunto para a resistência mínima de projeto prevê ensaios destrutivos, com pelo menos dez etapas de carga, com repetição para 3 modelos geométricos idênticos em escala real e com traçado de diagramas carga x deslocamento.

O objetivo destes ensaios foi reproduzir paredes geralmente empregadas em habitações sociais. Desta forma, foram confeccionadas 5 paredes conforme dimensões apresentadas na Figura 1, sendo 3 paredes de *Eucalyptus cloeziana* e 2 de *Eucalyptus grandis*. Para o atendimento às condições de carregamento foram seguidas as prescrições da NBR7190 (1997). Nos ensaios de impacto de corpo mole, corpo duro e compressão simples, as condições de contorno impostas foram baseadas nas condições verificadas na prática.

A carga na borda superior das paredes foi aplicada por um cilindro hidráulico e distribuída por meio de uma viga metálica. Nos ensaios de impacto de corpo mole e duro a carga distribuída (q) foi de aproximadamente 7000 N/m, com o intuito de se caracterizar o carregamento típico de um telhado. Os ensaios realizados nos protótipos das paredes estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Ensaios realizados nas paredes de MLC

Espécie utilizada na fabricação dos elementos	Número de elementos ensaiados	Tipo de Ensaio
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	3	Compressão simples
		Resistência ao impacto de corpo mole
		Resistência ao impacto de corpo duro
<i>Eucalyptus grandis</i>	2	Compressão simples
		Resistência ao impacto de corpo mole
		Resistência ao impacto de corpo duro

2.2.2.1. Ensaio de compressão simples

Depois da parede montada e posicionada no pórtico, prosseguiu-se com a instrumentação. Os ensaios de compressão simples nas paredes foram realizados num pórtico de reação com capacidade de 1000 kN, equipado com um cilindro hidráulico controlado por uma bomba



manual para a aplicação do carregamento. O encurtamento da parede foi monitorado, durante o ensaio, por dois DTs instalados nas laterais da parede e os deslocamentos horizontais (flechas) foram monitorados por um DT posicionado no meio do terço superior, Figura 2.

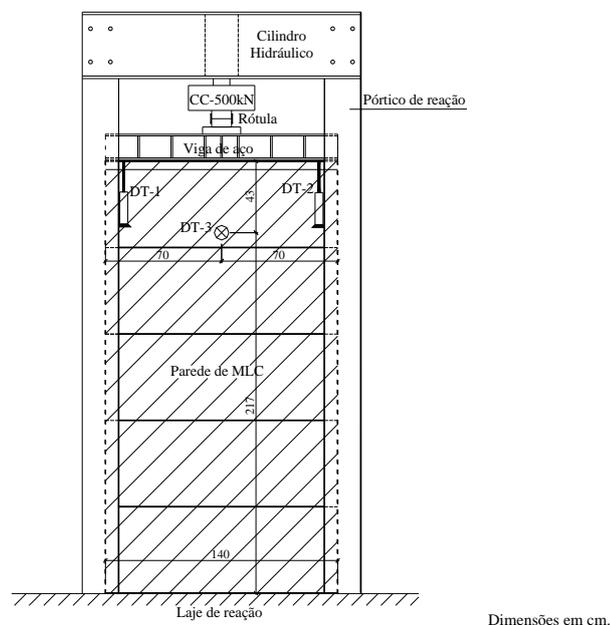


Figura 2: Instrumentação do ensaio de compressão simples da parede

2.2.2.2. Ensaio de impacto de corpo mole e de corpo duro

Para a realização dos ensaios de corpo mole, depois de montado e posicionado o protótipo no pórtico de ensaio, conforme a Figura 3, um saco de areia com massa de 40 kg foi posicionado tendo o seu centro tangenciando o centro da parede. O ensaio consistiu em suspender o saco de areia, por diferentes alturas, e abandoná-lo em queda livre na direção à parede. Devido às características construtivas e às condições de vinculação das paredes, que são idênticas tanto para um carregamento aplicado da direita para a esquerda, quanto da esquerda para a direita, fez-se o ensaio em apenas uma direção. Já para a realização dos ensaios de corpo duro, depois de montado o corpo-de-prova, foram utilizadas duas esferas maciças de aço, uma com massa de 500 g e outra com massa de 1000 g, para a imposição dos impactos na parede. Cada uma das esferas foi suspensa por um fio, tendo sua face tangenciando a parede quando em repouso. O ensaio consistiu em levantar cada esferas por diferentes alturas, e abandoná-la em queda livre na direção da parede, Figura 4.

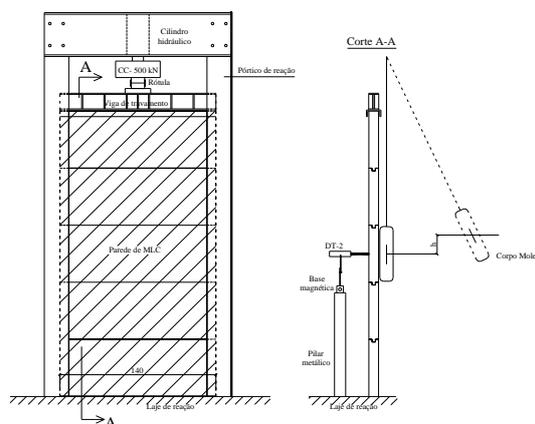


Figura 3: Ensaio de impacto de corpo mole

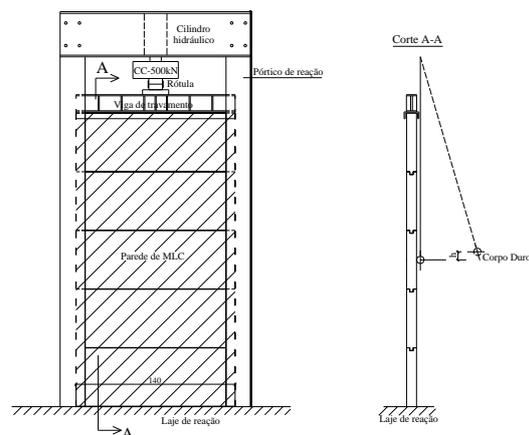


Figura 4: Ensaio de impacto de corpo duro

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização física e mecânica da madeira

Os valores de referência médios para as propriedades físicas e mecânicas do *Eucalyptus cloeziana* e *grandis*, encontrados na bibliografia consultada são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Valores médios das propriedades do *Eucalyptus cloeziana* e *Eucalyptus grandis*

Espécie	ρ_{ap} (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_v (MPa)	E_{co} (MPa)	Fonte
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	822	51,8	90,8	4,0	10,5	13963	NBR 7190 (1997)
<i>Eucalyptus grandis</i>	640	40,3	70,2	2,6	7,0	12813	

3.2. Ensaio de compressão simples

Os resultados dos ensaios de compressão simples nas paredes de *Eucalyptus cloeziana* e *Eucalyptus grandis* são apresentados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 4: Resultados dos ensaios de compressão simples nas paredes de *Eucalyptus cloeziana*

Parede	Carga máxima aplicada (kN)	Flecha ⁽¹⁾ máxima (mm)	Deslocamentos vertical (encurtamento) máximo (mm)	Inclinação do gráfico carga × deslocamento (kN/mm)
A	350	0,97	6,88	54,599



B	350	0,95	9,16	54,229
C	350	2,31	10,24	45,788

(1) Deslocamento horizontal.

Tabela 5: Resultados dos ensaios de compressão simples nas paredes de *Eucalyptus grandis*

Parede	Carga máxima aplicada (kN)	Flecha ⁽¹⁾ máxima (mm)	Deslocamentos vertical (encurtamento) máximo (mm)	Inclinação do gráfico carga × deslocamento (kN/mm)
A	200	0,87	13,22	16,030
B	244	1,30	21,00	16,190

(1) Deslocamento horizontal.

Analisando as Tabelas 4 e 5 percebe-se que as paredes de *Eucalyptus cloeziana* se comportaram melhor, apresentaram maiores cargas, menores deslocamentos e consequentemente maiores rigidezes. Um gráfico representativo do comportamento das paredes nos ensaios de compressão simples é apresentado na Figura 5.

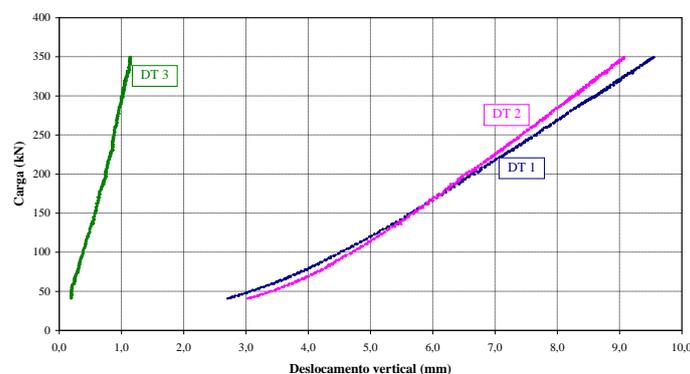


Figura 5: Compressão Parede B – Carga × deslocamento

3.3. Ensaios de impacto de corpo mole e de corpo duro

Como resultados dos ensaios de impacto de corpo mole são apresentados os seguintes deslocamentos: horizontal instantâneo (d_h), obtido pelo DT no momento do impacto; o deslocamento horizontal residual (d_{hr}), obtido pelo DT após o impacto e passado o período de estabilização da parede. Os resultados são apresentados na Tabela 6. Os resultados dos ensaios de corpo duro são apresentados na Figura 7. Devido a limitações de altura no laboratório não foram realizados os ensaios com energia de impacto de 720J.

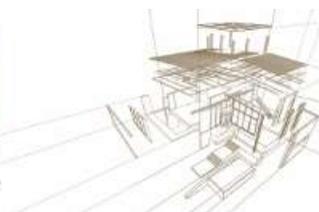


Tabela 6: Resultados dos deslocamentos medidos nos ensaios de impacto de corpo mole

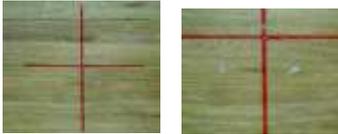
Parede	Energia (J)	<i>Eucalyptus cloeziana</i>		<i>Eucalyptus grandis</i>	
		Instantâneo - d_h (mm)	Residual - d_{hr} (mm)	Instantâneo - d_h (mm)	Residual - d_{hr} (mm)
A	60	1,8	0,3	3,1	0,2
	120	4,5	0,6	6,7	0,2
	180	6,3	0,6	8,8	0,2
	240	9,4	0,4	13,9	0,4
	360	13,8	0,2	20,8	0,6
	480	16,9	0,3	23,9	0,6
	600	22,0	0,2	30,3	0,6
B	60	2,0	0,1	2,6	0,3
	120	3,0	0,1	6,5	0,3
	180	4,4	0,1	9,1	0,3
	240	5,5	0,4	8,1	0,3
	360	7,2	0,2	11,2	0,3
	480	9,0	0,2	14,7	0,3
	600	10,0 ⁽¹⁾	0,3 ⁽¹⁾	19,4	0,3
C	60	1,5	0,3	⁽¹⁾ Pequena escamação na região do impacto (ver Figura 6). 	
	120	2,6	0,2		
	180	3,9	0,2		
	240	7,1	0,2		
	360	8,7	0,1		
	480	10,2	0,2		
	600	13,6	0,2		

Figura 6: Escamação na parede B de *Eucalyptus cloeziana* no ensaio com energia de impacto de 600 (J)

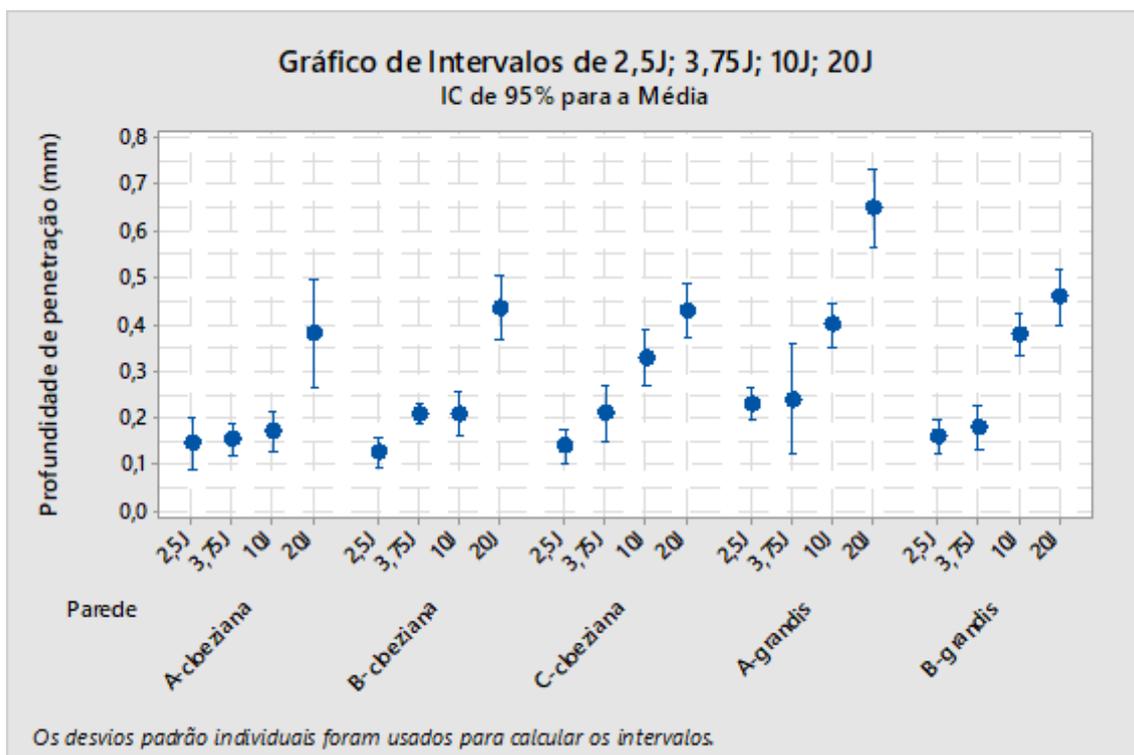


Figura 7: Resultados ensaios corpo duro – Energia de impacto \times profundidade de penetração

4. CONCLUSÕES

Analisando-se os resultados observou-se que as paredes de *Eucalyptus cloeziana* se comportaram melhor do que as paredes de *Eucalyptus grandis*. Não houve grandes danos, apenas leves escamações superficiais nos ensaios com a maior energia de impacto. A partir dos critérios estabelecidos para os ensaios de corpo mole (condições para dh e dhr) na NBR15575 (2013) pode-se afirmar que o desempenho das paredes pode ser classificado como Intermediário ou Superior. As profundidades das moças medidas nos ensaios de impacto de corpo duro foram muito inferiores aos limites estabelecidos pela NBR15575 (2013). Nos ensaios com a esfera de 1000 g não foram observadas fissuras ou traspases em nenhuma das paredes ensaiadas. Pode-se afirmar quanto às análises dos resultados dos ensaios de corpo duro que o desempenho das paredes pode ser classificado como Intermediário ou Superior.

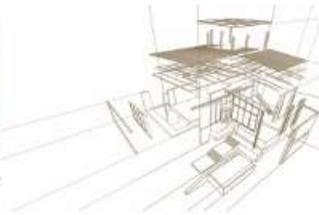
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amorim, S. T. A. A. *et al*, (2017). A madeira laminada cruzada: aspectos tecnológicos, construtivos e de dimensionamento.

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

Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, NBR 15575 (2013). Edificações habitacionais, Rio de Janeiro.

Building and Construction Authority, (2018). Mass Engineered Timber (MET) Guidebook.



4º CONGRESO
LATINOAMERICANO
DE ESTRUCTURAS
DE MADERAS

Cabral, C. P. T. *et al* (2006). Propriedades de chapas tipo OSB, fabricadas com partículas acetiladas de madeiras de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus cloeziana* E *Pinus elliotii*.

Iwakiri, S. *et al.*, (2008). Produção de painel compensado estrutural de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*.

Macedo, L. B., *et al.* (2015). Propriedades físicas de painéis aglomerados de madeira produzidos com adição de película de polipropileno biorientado.