

DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ESCORREGAMENTO (K_{SER}) PARA LIGAÇÕES CAVILHADAS EM PAINÉIS DE MADEIRA MACIÇA TIPO DCLT

Marcos Cesar de Moraes Pereira¹ (marcoscesar@sc.usp.br); **Carlito Calil Junior²** (calil@sc.usp.br)

¹INCT – Madeiras da Amazônia, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Manaus, Amazonas; ²Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo, (USP), São Carlos, São Paulo.

Resumo

Os painéis de madeira maciça têm ganhado espaço na construção em madeira em diversos países, principalmente nos países europeus. O maior representante destes produtos é o *Cross Laminated Timber* (CLT), ou Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), em português, que tem ganhado mercado e notoriedade devido a suas características de rigidez que possibilitam o uso em prédios multi-pavimentos. Na mesma linha, nos últimos anos foram desenvolvidos outros painéis estruturais de lamelas cruzadas que não utilizam ligação através de adesivos, mas sim por pregos, parafusos ou cavilhas. Por se tratar de materiais desenvolvidos recentemente, nem todos estão normatizados ou possuem métodos de ensaio para determinação das características físicas. No caso do painel cavilhado de lamelas cruzadas (DCLT - *Dowel Cross Laminated Timber*), o método de determinação do módulo de escorregamento da ligação presentes nas normas não atende a realidade do uso do painel na flexão. Neste sentido, este estudo teve por objetivo a criação de um método de ensaio para a medição do módulo de deslizamento da ligação tal qual ela ocorre no uso normal do painel. Foram desenvolvidos e ensaiados quinze corpos de prova, formados por lamelas de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, com cavilhas de Pau-roxo (*Peltogyne spp.*, *Leguminosae*), com diâmetro de 19 mm. Os resultados experimentais foram utilizados em dois métodos de cálculo de resistência de painéis de lamelas cruzadas. Os resultados analíticos por sua vez, foram comparados aos resultados obtidos por ensaios em painéis de grandes dimensões produzidos com as mesmas espécies e ensaiados na flexão. O comparativo mostrou que o método de ensaio desenvolvido foi apropriado pois os resultados analíticos e experimentais foram idênticos. Com isso concluiu-se que o método desenvolvido é adequado para determinação do módulo de escorregamento da ligação cavilhada ou por pino liso em painéis de lamelas cruzadas tipo DCLT.

Palavras-chave: Ligação. Cavilhas. DCLT. CLT. Painel de Madeira Maciça.

Abstract

Solid wood panels have been increase in wood construction in several countries, especially in European countries. The largest representative of these products is Cross Laminated Timber (CLT), which has gained market and notoriety due to its rigidity characteristics that allow the use in multi-storey buildings. In the same vein, in recent years other cross-sided structural panels have been developed that do not use adhesive bonding, but rather nails, screws or dowels. Because they are newly developed materials, not all are standardized or have test methods for determining physical characteristics. In the case of the Dowel Cross Laminated Timber (DCLT), the method of determining the Slip Module present in the standards does not meet the reality of using the bending panel. In this sense, this study aimed to create a test method for the measurement of the

[Portal de Eventos Científicos da Escola de Engenharia de São Carlos](#)

bond slip module as it occurs in normal use of the panel. Fifteen specimens, consisting of *Pinus taeda* and *P. elliottii* coverslips, were developed and tested, with 19 mm diameter Pau-roxo dowels (*Peltogyne spp.*, *Leguminosae*). Experimental results were used in two methods of calculating CLT panel strength. The analytical results, in turn, were compared to the results obtained by tests on large panels produced with the same species and tested on flexion. The comparison showed that the developed test method was appropriate because the analytical and experimental results were identical. Thus, it was concluded that the developed method is suitable for the determination of the slip module in DCLT type cross-sided panels.

Keywords: Timber connection. Dowel. DCLT. CLT. Solid Wood Panels

1 Introdução

O uso da madeira em estruturas é mais comum nos países europeus, que desde o início do século passado desenvolveram soluções para unir e compor peças de grandes seções transversais e com comprimentos maiores, inicialmente para suprir a demanda por madeira que na época estava escassa devido ao crescimento das cidades após a revolução industrial, e posteriormente por necessidades construtivas. Nessa época surgiram as vigas laminadas unidas inicialmente por pregos e cavilhas, mas que foram substituídas pelas ligações coladas, que são mais resistentes e com menor deformações. Desde então o uso do laminado colado evoluiu, até que nos anos de 1980 e 90, foram desenvolvidos os painéis de madeira colada cruzada, chamados de CLT.

Segundo Gagnon e Crespell (2011), foi buscando alternativas menos impactantes e estruturalmente resistentes que pesquisadores austríacos desenvolveram o *Cross Laminated Timber* (CLT), que em português é chamado de Madeira Laminada Colada Cruzada (MLCC), um painel formado por lamelas de madeiras coladas em camadas transversais defasadas 90° entre si, com números de camadas variando de 3 a 9, sempre em números ímpares, de modo a obter espessuras de dimensões estruturais, variando de 57 a 500 mm. O CLT é basicamente um compósito formado por madeira e um adesivo químico, que devido a sua característica de cruzamento das camadas consegue obter uma rigidez semelhante às placas de concreto armado.

O CLT (Figuras 1 e 2) ganhou o mercado a partir dos anos 2000, por: propiciar facilidade de construção, ser pré-fabricado, apresentar boa relação resistência x peso, ser ambientalmente amigável e possibilitar a construção de prédios multipavimentos.

Figura 1- Residência unifamiliar construída em CLT na Áustria.



Fonte: Gagnon e Crespell (2011)

Portal de Eventos Científicos da Escola de Engenharia de São Carlos

Figura 2- Detalhe de uma seção de um painel de CLT



Fonte: Gagnon e Crespell (2011)

Apesar das vantagens apontadas, o CLT utiliza adesivos químicos estruturais geralmente a base de poliuretano ou melamina formaldeído. Visando minimizar este uso, e ganhar mais eficiência ambiental, surgiu na Europa o CLT com união de cavilhas de madeira. Alguns autores e fabricantes chamam de Brettstapel, mas basicamente trata-se de um painel de CLT unido por cavilha (*dowel*), daí do termo DCLT (*Dowel Cross Laminated Timber*). A Figura 3 ilustra uma casa construída na Áustria pela empresa Thoma com painel DCLT.

Figura 3- Exemplo de estrutura construída em painel de lamelas cruzadas cavilhada



Fonte: Thoma GmbH

Neste sentido, este estudo se aprofunda no tema da união de lamelas com uso de cavilhas, apresentando um modelo de ensaio e corpo de prova para determinação do Módulo de Deslizamento da ligação (k_{ser}) da ligação cavilhada durante o uso do painel na flexão, como é o caso da aplicação com elemento de piso ou cobertura. Justifica-se esse trabalho no fato das normas atuais apresentarem um método de ensaio para determinação do Módulo de Deslizamento da ligação somente para os casos como de ligações de banzos em tesouras, sendo que o mecanismo da ligação entre lamelas cruzadas é diferente desses casos.

2 Revisão de literatura

A ideia de unir peças de madeira com cavilha não é recente como foi citado na introdução deste estudo, porém o estudo das ligações em um painel de lamelas cruzadas é bem recente e não contempla muita literatura. O que o DCLT apresenta de novidade é a configuração das lamelas de forma cruzada, porém o uso do de lamelas paralelas foi explorado por alguns pesquisadores antes do desenvolvimento do CLT.

Segundo Henderson (2009), o engenheiro e professor alemão Julius Natterer nos anos 1970 já trabalha na ideia de fabricar um painel unido por cavilhas que era feito com as lamelas paralelas.

No Brasil, Gava (2005) apresentou um estudo sobre sugestões de componentes de madeira para habitação social de baixa renda, e entre elas um painel feito com lamelas de madeira de pinus paralelas unidas com cavilhas de madeira de eucalipto de 1 polegada (25,4 mm)

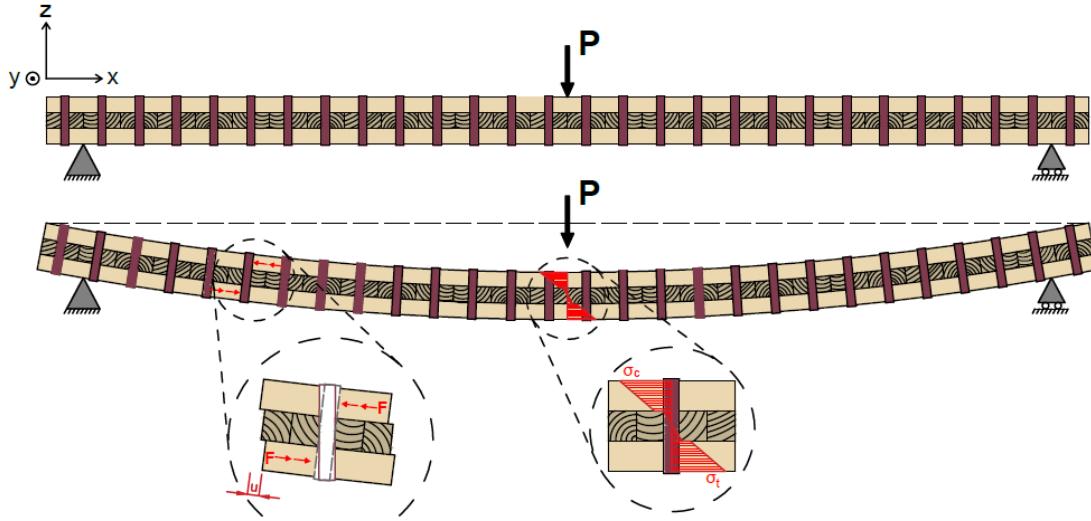
Mais recentemente, Clark et al. (2012), em seu estudo sobre produtos inovadores a base de madeira destacaram que o DCLT foi o produto engenheirado de madeira mais inovador desde o início dos anos 2000.

Sochacki (2014) comparou duas maneiras de colocar cavilhas de madeira no painel DCLT, sendo uma pela forma conhecida como *wood welding* (soldagem de madeira) que é através da introdução da cavilha em alta rotação em furos feitos nas lamelas do painel até que se aqueça a temperatura de fusão da lignina, “soldando” a cavilha à madeira do painel. A outra forma usada pelo autor foi o aquecimento prévio da cavilha em estufa para perda de umidade e consequentemente retração, de forma que ao ser inserida no furo a cavilha ganhe umidade do ambiente e fique presa de forma permanente.

3 Materiais e métodos

Para determinação do módulo de deslizamento K_{ser} que atua de fato no painel em serviço, foi necessário o desenvolvimento de um novo corpo de prova não previsto nas normas. Conforme ilustrado na Figura 4, o movimento realizado pela cavilha durante a flexão do painel não é o mesmo que o previsto pelos ensaios de ligação que foram pensados para situações como as ligações de banzos e montantes de uma tesoura por exemplo. O valor do K_{ser} é importante pois é utilizado no cálculo analítico da rigidez do painel através Teoria das Vigas Compostas Mecanicamente chamado de Método Gamma (γ -method) e também através do Método da Analogia do Cisalhamento (Shear Analogy Method – SAM), conhecido como método Kreuzinger, nome do seu criador (KREUZINGER,1999). Os dois métodos estão detalhados no trabalho apresentado por Pereira (2019) ou por Gagnon e Popovski (2011). Além disso o Método Gamma é descrito no anexo B do Eurocode 5: Design of timber structures (2004) e consta na atual revisão da norma brasileira de Estruturas de Madeira NBR 7190.

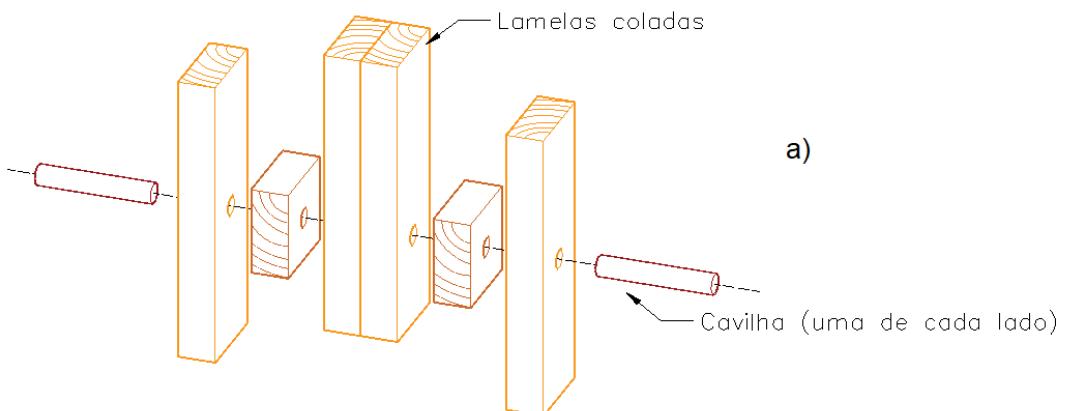
Figura 4 - Detalhe da deformação da cavilha durante a aplicação da carga no painel



Fonte: Pereira (2019)

Para simular o deslizamento das camadas superiores e inferiores do painel DCLT o novo modelo de corpo de prova consistiu em duas seções de um painel DCLT de três camadas cada um, colados (ligação rígida) com adesivo Fenol Resorcinol um ao outro, como ilustrado na figura 5. Primeiramente foram coladas as lamelas centrais, e com o adesivo já curado, foi montado o corpo de prova, com duas cavilhas de $\frac{3}{4}''$ x 114 mm de cada lado. As cavilhas foram alocadas de forma a simular o comportamento delas no painel.

Figura 5- Corpo de prova para ensaio de ligação perpendicular com uma seção de corte em desenho 3D explodido.



Fonte: Próprios Autores (2019)

A montagem dos corpos de prova foi feita levando em consideração as densidades de cada peça, de forma a minimizar a influência da variação da densidade durante a flexão do corpo de prova. Para isso, todas as peças foram separadas em 4 grupos, com configurações apresentadas na tabela 1. Foram montados e ensaiados 15 corpos de prova, conforme detalhado na Figura 5.

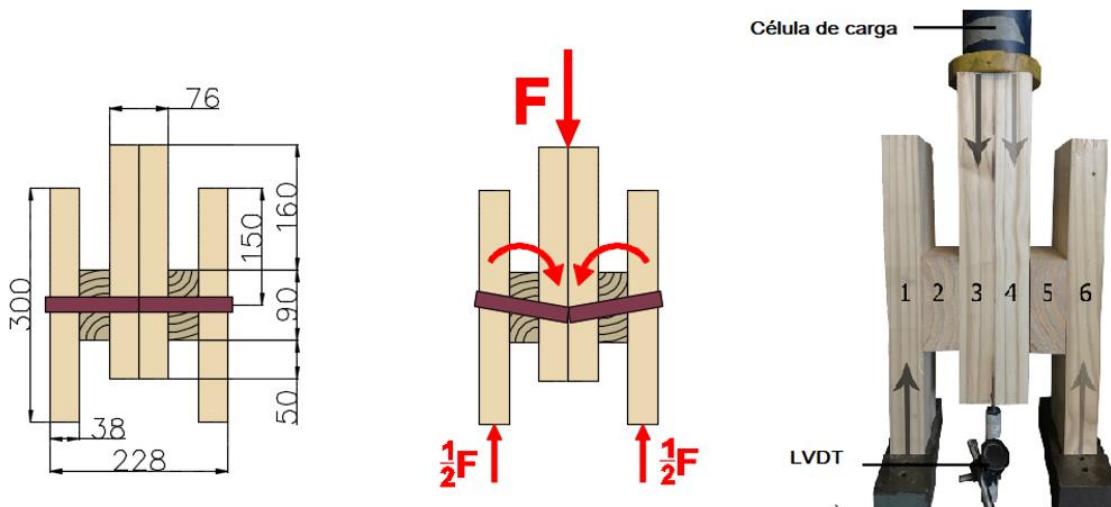
Portal de Eventos Científicos da Escola de Engenharia de São Carlos

Tabela 1- Faixas de densidade para confecção dos corpos de prova

Grupo	Faixa de Densidade ρ (kg/m ³)
1	340 a 370
2	370 a 385
3	385 a 430
4	430 a 480

Fonte: Autores (2019)

Figura 6- à esquerda: dimensões do corpo de prova (unidade em mm); ao centro: Deslocamento previsto do corpo de prova durante ensaio; à direita: Corpo de prova durante ensaio

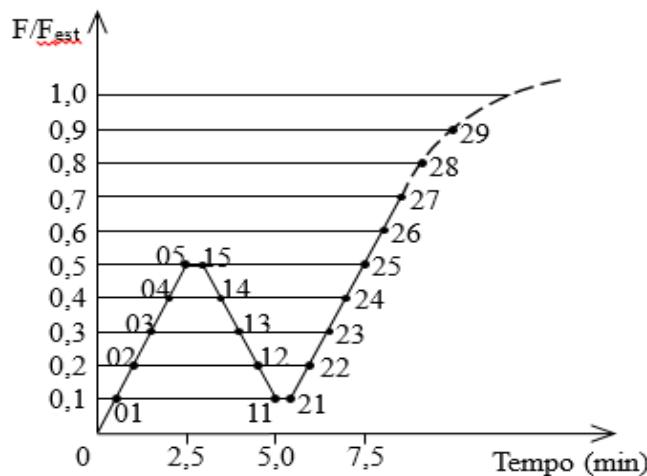


Fonte: Autores (2019)

Os corpos de prova foram ensaiados por compressão de acordo com o esquema apresentado na figura 7. Os equipamentos utilizados foram: uma máquina universal de ensaio EMIC modelo DL3000, na qual foram posicionados os corpos de prova e foi feito a aplicação do ciclo de carga e o controle do tempo do ciclo; e um aquisitor de dados ligado a um transdutor de deslocamento (LVDT) posicionado abaixo do corpo de prova e a uma célula de carga acima do corpo de prova, como ilustrado na figura 6. Esse aquisitor transmitia os dados a um *laptop* no qual o *software* do dispositivo fazia o tratamento e armazenamento dos valores do ensaio.

Inicialmente levou-se à ruptura um corpo de prova piloto para estimar a carga de ruptura (F_{est}) para os demais. O procedimento do ensaio foi feito através de um ciclo (Figura 7) de carregamento iniciando com a aplicação de uma carga equivalente à $0,5 \cdot F_{est}$, mantendo-se por 30 segundos, descarregando até uma carga de $0,1 \cdot F_{est}$, mantendo por mais 30 segundos. Posteriormente aplicou-se novamente a carga até atingir a força última ou o deslizamento de 15 mm, o que ocorreu primeiro. A velocidade de aplicação da carga foi mantida constante pela máquina, de forma que a força última ou o deslizamento de 15 mm era atingido em um tempo entre 5 a 7 minutos.

Figura 7- Forma de aplicação do carregamento.



Fonte: Projeto de Norma Brasileira PN 02_126.10-001_4 (2019)

Com os valores F_{est} e $u_{i,mod}$, determinou-se o valor do módulo de deslizamento da ligação, K_{ser} , através da equação 1. O cálculo do K_{ser} apresentado na equação 1 é uma regressão linear dos dados de força e deformação, pois segundo os estudos de Branco, Cruz e Piazza (2009), o valor da regressão linear dos valores de força e deformação obtido no ensaio para medição do deslizamento são equivalentes ao método proposto pelo Eurocode EN 26891 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 1991), com a vantagem de ser de mais fácil obtenção.

$$K_{ser} = \frac{(0,5F_{est} - 0,1F_{est})}{(u_{05} - u_{01})} \cdot \frac{1}{2} \quad (1)$$

É importante ressaltar que o K_{ser} foi dividido por 2 pois o ensaio foi realizado com duas cavilhas simultaneamente.

4 Resultados

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos para o Módulo de Deslizamento da ligação através do ensaio desenvolvido.

Tabela 2- Valores do módulo de deslizamento K_{ser}

CP	Módulo de deslizamento da ligação K_{ser} [N/mm]
1	1289
2	2563
3	1519
4	1141
5	1660
6	1685
7	1399
8	1497
9	1021
10	1924
11	1061
12	894
13	1552
14	1564
15	1374
$K_{ser,Medio}$	1476
$K_{ser,K}$	983
<i>Desvio Padrão</i>	410
<i>Coef. variação</i>	27,8

Fonte: Autores (2019)

A partir dos resultados experimentais obtidos por Pereira (2019), para um painel DCLT de 3 camadas, foram calculados os valores do módulo de deslizamento usando os métodos Gamma e o método SAM, descritos no item anterior, para comparação com o valor obtido no ensaio desenvolvido. Os resultados obtidos podem ser comparados através dos dados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3- Módulos de deslizamento da ligação K_{ser} e comparativos [N/mm]

Método experimental	Método Gamma (γ)	Método SAM
1476	1342	1356
Comparativos		
Exp. x Gamma	-	1,09 %
Exp. x SAM	-	1,08%

Fonte: Autores (2019)

5 Conclusões

Os autores concluíram que o corpo de prova e o método de ensaio desenvolvido para simular o comportamento da ligação cavilhada em painéis do tipo DCLT se mostrou eficiente, pois os valores obtidos neste ensaio foram próximos aos valores obtidos

analiticamente por dois métodos de cálculo, como é descrito na tabela 3, ficando a diferença entre os métodos abaixo de 10%. Apesar disso, sugere-se que novos estudos sejam realizados com maior número de corpos de prova e variação de diâmetros das cavilhas para avaliação da convergência e validação do método proposto.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 1997.

BRANCO, J.M.; CRUZ, P.J.S.; PIAZZA, M. Experimental analysis of laterally loaded nailed timber-to-concrete connections. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 1, p.400-410, jan. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.011>.

CLARK, D. et al. Innovative wood-based products: 2011-2012. In: UNECE/FAO. Nações Unidas (Org.). **Forest Products Annual Market Review 2011-2012**. Nova York: United Nations Publications, 2012. Cap. 13. p. 141-150.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings**, EN 1995-1-1:2004, Bruxelas, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Timber Structures. Joints Made With Mechanical Fasteners. General Principles For The Determination Of Strength And Deformation Characteristics**, EN 26891:1991, Bruxelas, 1991.

GAGNON, S.; CRESPELL, M. Structural design of cross-laminated timber elements. In: **CLT Handbook - Cross Laminated Timber - Canadian Edition**. GAGNON, S.; PIRVU, C. (Ed.). Quebec-CA: Fpinnovation, 2011. Cap. 3. p. 1-82.

GAGNON, S.; POPOVSKI, M. Structural design of cross-laminated timber elements. In: **CLT Handbook - Cross Laminated Timber - Canadian Edition**. GAGNON, S.; PIRVU, C. (Ed.). Quebec-CA: Fpinnovation, 2011. Cap. 3. p. 1-82.

GAVA, M. **Viabilidade técnica e econômica da produção de componentes construtivos para habitação social utilizando madeira serrada de pinus de terceira classe de qualidade**. 2005. 233 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005

HENDERSON, J. **Brettstapel: An Investigation into the Properties and Merits of Brettstapel Construction**. 2009. 92f. Dissertação (Mestrado) - Department of Architecture and Building Design, Faculty of Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, UK, 2009.

KREUZINGER, H., **Flächentragwerke: Platten, Scheiben und Schalen; Berechnungsmethoden und Beispiele.** Informationsdienst Holz, Brücken aus Holz, 1999, p.43-60.

PEREIRA, M.C.M. **Painel estrutural de madeira macia tipo DCLT: Estudo experimental, analítico e numérico de dois painéis de lamelas cruzadas com ligações cavilhadas.** 170 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

SOCHACKI, B. **Brettstapel panels: in-plane strength and stiffness.** 2014. 45 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura, Department of Architecture and Civil Engineering, University of Bath, Bath, UK, 2014.

THOMA HOLZ GMBH (Áustria). **Projects.** 2019. Disponível em: <<https://www.holz100canada.com/residential.html>>. Acesso em: 21 nov. 2019