

Recebido:15/04/2019 Aprovado: 24/10/2019

Investigação experimental física da influência de entalhes na resistência ao cisalhamento de vigas de madeira

Ana Flávia Baú Carneiro⁽¹⁾, Elisabeth Penner⁽²⁾, Felipe Perretto⁽³⁾, Cristófer Bernardi Scremim⁽⁴⁾

RESUMO

A madeira é atualmente considerada uma alternativa ecológica a materiais que provocam danos ambientais severos, sendo cada vez mais utilizada. Entretanto, sua heterogeneidade e anisotropia fazem com que suas propriedades físicas e mecânicas sejam diferentes em todas as direções, o que deve ser considerado nos dimensionamentos. A NBR 7190/97 recomenda que o valor de resistência ao cisalhamento deve ser tomado na direção paralela às fibras, o que pode sugerir um superdimensionamento das peças. O presente trabalho tem como objetivo investigar a resistência ao cisalhamento perpendicular às fibras em vigas entalhadas submetidas à flexão simples reta e verificar se as dimensões mínimas exigidas pela norma para a execução de entalhes podem ser modificadas. Foram ensaiadas vigas das espécies *Eucalyptus saligna* e *Araucaria angustifolia* com entalhes do tipo reto e misulado. As peças entalhadas foram submetidas ao cisalhamento, incluindo os apoios das vigas já ensaiadas, para comparação das resistências obtidas nas duas situações. Observou-se o fendilhamento esperado na quina do entalhe, bem como a ruptura ao cisalhamento no plano horizontal, apesar da solicitação no plano vertical. Esse resultado confirma que a resistência ao cisalhamento na direção paralela às fibras é preponderante em qualquer situação de solicitação e os critérios da NBR 7190/97 não carecem de modificação.

Palavras-chave: Entalhe, vigas de madeira, vigas entalhadas, cisalhamento na madeira

(1) Engenheira Civil, Departamento de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, anaflavia95@hotmail.com

(2) Engenheira Civil, Doutora em Engenharia de Estruturas, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, epenner@utfpr.edu.br

(3) Esp. – Esp. em Construções Sustentáveis, Arquiteto e Urbanista, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, fperretto@utfpr.edu.br

(4) MSc. – Engenheiro Civil, Professor, Centro Universitário Curitiba (UNICURITIBA), cristoferscremim@hotmail.com

Endereço para correspondência: R. Dep. Heitor Alencar Furtado, 5000 – Campo Comprido, Curitiba – PR, 81280-340

1 INTRODUÇÃO

Como material de importância histórica para o desenvolvimento da humanidade, a madeira é considerada uma alternativa ecológica a materiais que provocam danos ambientais severos, como compostos de cimento, plásticos e metais (IPT, 2009). Sua sustentabilidade está relacionada ao fato de ser um material reciclável, renovável e biodegradável, além de necessitar de menos energia para sua transformação (Marques, 2008).

Na construção civil, a madeira é utilizada de maneira temporária em escoramentos, formas e andaimes ou definitiva, em estruturas de cobertura, esquadrias, forros e pisos. Suas ligações são comumente realizadas por meio de entalhes em vigas de madeira a fim de facilitar a montagem da estrutura (Vieira; Gesualdo, 2016).

Ao longo das últimas décadas observa-se um aumento da utilização da madeira devido à sua estabilidade e por conjugar propriedades consideradas frequentemente como contraditórias (dureza elevada e comportamento não frágil, por exemplo). Além disso, com a evolução tecnológica desse material, os profissionais procuram cada vez mais redescobri-lo e reinterpretá-lo, utilizando-o de um modo diferente ou empregando técnicas antigas de forma distinta (Almeida, 2012; Trouy-Triboulot; Triboulot, 2012).

No Brasil, ainda não se observam estruturas de madeira com frequência como em países da Europa e América do Norte, principalmente devido ao aspecto cultural. Entretanto, observa-se um crescimento na sua utilização, principalmente devido à conscientização dos profissionais quanto ao seu potencial construtivo e suas vantagens tanto estruturais como ambientais. A madeira apresenta boa relação resistência/peso (principalmente à tração) e alta durabilidade, além de atuar como isolante térmico, acústico e elétrico (Medeiros, 2010; Calil Junior *et al.*, 2003).

Segundo Medeiros (2010), a falta de conhecimento técnico e científico acaba ocasionando a ausência de projetos estruturais adequados, enquanto a carência de mão de obra especializada leva à necessidade de recorrer a estudos científicos que possibilitem a utilização da madeira de forma eficiente e produtiva (Marques, 2008).

É importante ressaltar também que a heterogeneidade e anisotropia da madeira fazem com que suas propriedades físicas e mecânicas sejam diferentes em todas as direções (Pfeil; Pfeil, 2003). Por esses fatores, durante a concepção de estruturas de madeira, seu dimensionamento deve ser realizado cuidadosamente, levando em consideração a orientação das fibras na peça (Vieira; Gesualdo, 2016).

A fim de padronizar as informações obtidas para cada espécie de madeira, suas propriedades físicas e mecânicas são determinadas por meio de ensaios descritos na norma

ABNT NBR 7190/97: Projeto de Estruturas de Madeira. Dentre essas propriedades, a resistência ao cisalhamento paralela às fibras apresenta-se como um parâmetro essencial para a caracterização completa da madeira para uso estrutural (Pfeil; Pfeil, 2003).

Segundo Calil Junior *et al.* (2003), a resistência ao cisalhamento da madeira é diretamente influenciada pela direção do plano de atuação das tensões cisalhantes, sendo menor na direção longitudinal. No ensaio padrão definido pela norma brasileira, a resistência ao cisalhamento é definida a partir do seu valor longitudinal, paralelo às fibras, mesmo nos casos em que a sollicitação ocorre na direção perpendicular, como é o caso de vigas submetidas à flexão. (Pfeil; Pfeil, 2003). Essa recomendação pode ser justificada por meio do Teorema de Cauchy, o qual afirma que as tensões cisalhantes são iguais em todas as direções.

A adoção do menor valor de resistência para o cálculo das estruturas pode ocasionar o superdimensionamento dos projetos e influenciar principalmente nas dimensões mínimas de encaixes em vigas. Além disso, ainda existem deficiências na NBR 7190/97 quanto ao cálculo de entalhes, principalmente pela falta de justificativas e esclarecimentos às recomendações estabelecidas (Cordovil; Rizzo, 2002).

Neste trabalho, estuda-se a resistência ao cisalhamento perpendicular às fibras no caso de vigas entalhadas submetidas à flexão simples e verifica-se se as dimensões mínimas exigidas pela NBR 7190/97 para a execução de entalhes podem ser atualizadas.

2. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA MADEIRA

Considerada um material anisotrópico, a madeira só pode ser corretamente definida pela determinação individual de suas características mecânicas em cada uma das direções principais de sua estrutura: direção axial, direção tangencial e direção radial (Figura 1). Na prática, a resistência na direção tangencial é dada como nula, tornando a madeira um material ortotrópico (Crubilé, 2012; Pfeil; Pfeil, 2003).

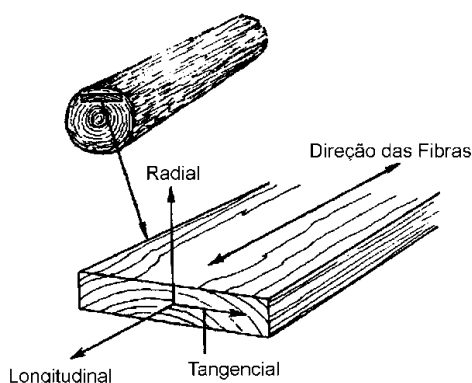


Figura 1 – Eixos principais da madeira em relação à direção das fibras. Fonte: Modificado de Ritter (1990)

O cisalhamento é uma sollicitação encontrada nas vigas que sofrem flexão,

especialmente nos apoios, sob cargas pontuais e em entalhes. Essa solicitação pode se tornar determinante para o dimensionamento de vigas curtas consideravelmente carregadas ou que contêm mudanças na seção transversal (Benoit et al., 2008).

Considerando uma viga bi apoiada de seção retangular, com largura b e altura h , fletida em relação ao eixo de maior inércia, tem-se que as tensões de cisalhamento surgem paralelamente ao eixo longitudinal (Figura 2). O equilíbrio é atingido quando tensões de valor igual surgem perpendicularmente ao eixo longitudinal (Porteous; Kermani, 2007 apud Vieira, 2016).

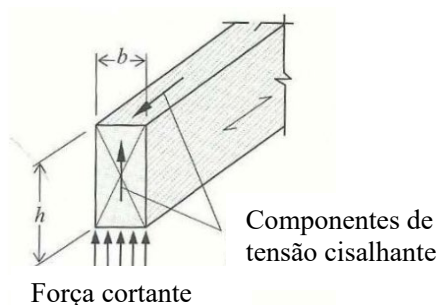


Figura 2 – Componentes da tensão cisalhante. Fonte: Adaptado de Porteous e Kermani (2007) apud Vieira (2016)

Observa-se, no entanto, que a propriedade complementar do cisalhamento, na qual *“todas as quatro tensões de cisalhamento devem ter valores iguais e serem direcionadas no mesmo sentido ou em sentido oposto uma das outras nas bordas opostas do elemento”* (Hibbeler, 2010, p. 22), é válida apenas para materiais isotrópicos, ou seja, que possuem características iguais em todas as direções (Hibbeler, 2010). Por ser considerada um material anisotrópico, a madeira não responde às tensões da mesma maneira em todas as direções (Pfeil; Pfeil, 2003).

Na NBR 7190/97, o valor de resistência ao cisalhamento é obtido ao longo da direção paralela às fibras (Figuras 3), na qual a resistência da madeira é menor. Numa situação de solicitação perpendicular às fibras, como é o caso do ensaio de resistência à flexão, o valor da resistência pode ser maior do que o observado na direção paralela às fibras.

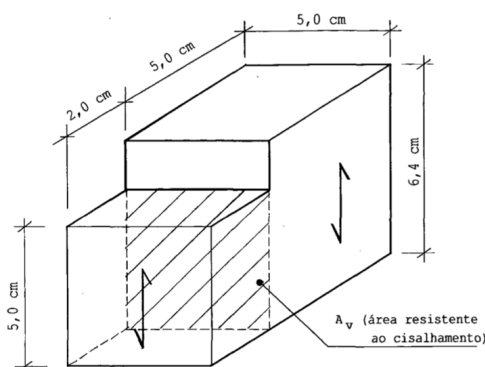


Figura 3 - Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Fonte: NBR 7190 (1997)

Na Figura 4 são ilustrados os planos de cisalhamento na direção paralela às fibras (a), situação que ocorre no ensaio de cisalhamento proposto pela NBR 7190/97, e na direção transversal ou perpendicular às fibras (b), que ilustra o plano de cisalhamento observado na região dos apoios no ensaio de flexão da NBR 7190/97.

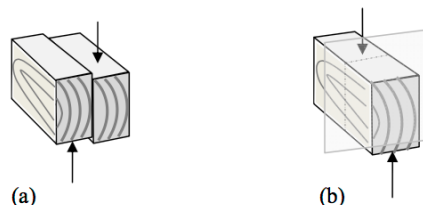


Figura 4 - Cisalhamento transversal (a) paralelo às fibras; (b) transversal às fibras. Fonte: Dos Santos (2007)

2.1 Tensões de cisalhamento em vigas entalhadas

De acordo com Cordovil e Rizzo (2002), um entalhe é caracterizado por uma variação brusca na seção transversal de peças de madeira. Trata-se de uma ferramenta muito utilizada para a realização de encaixes ou adaptações com outras peças na qual a transmissão de força é feita pelo contato dos elementos, sendo eficiente para esforços de compressão associados ao corte. Alguns dos tipos mais comuns de entalhes são ilustrados na Figura 5.

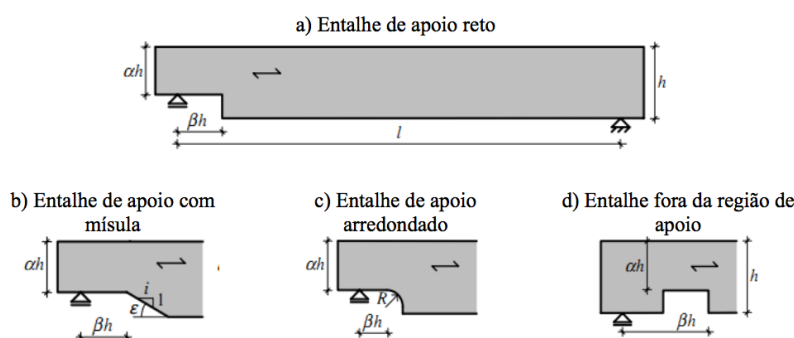


Figura 1 - Tipos mais comuns de entalhes. Fonte: Jockwer, Steiger e Frangi (2014)

Os entalhes são considerados os pontos mais fracos de uma construção, podendo reduzir significativamente a capacidade de suportar carga de uma peça se forem mal projetados ou executados (Rethink Wood, 2014). Isso ocorre devido à formação de pontos de concentração de tensões na região onde há mudança significativa de seção transversal, reduzindo consideravelmente a capacidade de carga da peça (Jockwer; Steiger; Frangi, 2014). No caso de vigas bi apoiadas, Gesualdo e Souza Jr. (2008) afirmam que a presença de entalhes nos apoios afeta principalmente a tensão cisalhante.

A NBR 7190/97 inclui um fator de majoração para o cálculo da tensão cisalhante solicitante na região do entalhe a fim de considerar a alteração no fluxo de tensões da região. Entretanto, Gesualdo e Sousa Jr. (2008) concluíram que a recomendação de cálculo da norma fica excessivamente a favor da segurança para todos os casos com h_1/h acima de 0,17.

Após modelagem de vigas entalhadas, Vieira (2016) observou que a tensão cisalhante máxima nas simulações não ocorreu no ponto médio da seção transversal reduzida pelo entalhe, como indica a teoria clássica da resistência dos materiais, e sim na quina do entalhe. Além disso, a autora obteve valores de tensão normal na quina dos entalhes superiores aos valores teóricos devido ao entalhe estar posicionado na face tracionada das vigas, causando maior perturbação na região.

2.2 Critérios de dimensionamento de acordo com a NBR 7190/1997

Segundo a NBR 7190 (1997), a máxima tensão de cisalhamento atuando no ponto mais solicitado da peça não deve ser superior à resistência do material naquele mesmo ponto ($f_{v0,d}$ - resistência ao cisalhamento na direção paralela às fibras). Para uma seção transversal retangular de dimensões b (largura) e h (altura) solicitada pela força cortante V_d , determina-se a máxima tensão de cisalhamento (τ_d) pela Equação (1).

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b \cdot h} \leq f_{v0,d} \quad (1)$$

A NBR 1790/97 determina que no caso de variações bruscas de seção transversal devidas a entalhes, deve-se multiplicar a tensão de cisalhamento na seção mais crítica, de altura h_1 (Figura 6), pelo fator h/h_1 , com h_1 limitado a $0,75 h$, como mostra a Equação (2).

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b \cdot h} \cdot \left(\frac{h}{h_1} \right) \leq f_{v0,d} \quad (2)$$

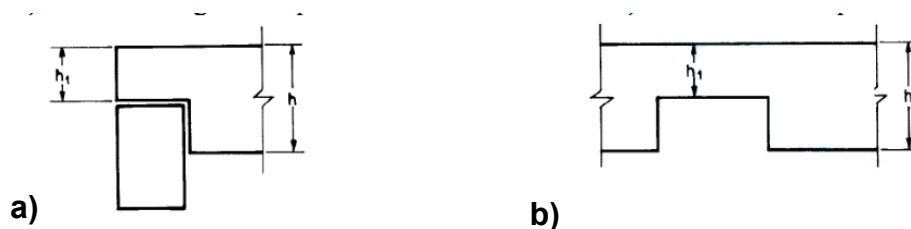


Figura 6 – Entalhes em vigas: a) na região do apoio; b) fora do apoio. Fonte: NBR 7190 (1997)

3 METODOLOGIA

Para verificar as dimensões mínimas exigidas para a execução de entalhes pela NBR 7190/97, vigas de duas espécies de madeira diferentes foram investigadas, *Eucalyptus saligna* e *Araucaria angustifolia*, com entalhes do tipo reto e misulado dimensionados de acordo com a NBR 7190/97. Os entalhes foram avaliados em duas situações diferentes: solicitados apenas ao cisalhamento e a flexão e cisalhamento.

Foram confeccionadas doze vigas com 2 metros de comprimento e seção transversal de 5x10cm, seis de cada espécie de madeira. Sendo assim, metade das vigas de cada espécie

possuía entalhe do tipo reto e a outra metade, misulado. Quatro vigas, duas de cada espécie, foram ensaiadas à flexão, com entalhes do tipo reto e misulado. Após o ensaio, os 8 apoios entalhados (4 retos e 4 misulados) foram retirados e ensaiados ao cisalhamento junto aos outros 16 entalhes (8 retos e 8 misulados) provenientes das outras 8 vigas não ensaiadas à flexão para comparação das resistências obtidas.

As dimensões dos entalhes foram definidas a partir da Equação 2, substituindo-se a resistência ao cisalhamento ($f_{v0,d}$) da espécie correspondente (6MPa para Araucária e 5MPa para Eucalipto, conforme NBR 7190/97), as dimensões da seção (b , h) e também o valor da altura do entalhe h_1 , considerada como $0,75.h$ (valor mínimo indicado pela norma). Com isso, obteve-se um valor para a altura do entalhe reto (h_1) de 7,5 cm.

Para o entalhe misulado, a variação de seção foi calculada como sendo igual a três vezes a diferença entre a altura da viga e a altura do entalhe, respeitando o limite absoluto $h_1 \geq 0,5.h$, conforme determinação da NBR 7190/97. O valor obtido para a altura do entalhe misulado (h_1) foi de 5 cm.

Depois de calculados, os entalhes foram executados a 10 cm da extremidade do vão da viga de modo a permitir o encaixe da estrutura nos apoios para o ensaio a flexão. Os entalhes foram executados com o auxílio de uma serra de esquadria de alta precisão e para o acabamento dos cortes foi utilizado um formão.

3.1 Ensaios

Para avaliação da resistência ao cisalhamento dos entalhes, foram realizados ensaios de resistência à flexão simples em 4 vigas e ensaios de resistência ao cisalhamento em todos os entalhes, conforme a NBR 7190/97.

3.1.1 Ensaio de Resistência à Flexão Simples

Para determinação das tensões de cisalhamento e ruptura, quatro vigas foram ensaiadas à flexão simples, duas de cada espécie, sendo duas com entalhe reto e duas com entalhe misulado. Os ensaios foram realizados com as vigas a umidade ambiente de modo a representar situações reais de utilização. Foram realizados dois ciclos de carregamento prévios e um ciclo de carregamento final, conforme a NBR 7190/97. As vigas foram posicionadas de maneira que a força fosse aplicada no meio do vão, bem como os entalhes ficassem o mais próximo possível dos apoios.

3.1.2 Ensaio de Resistência ao Cisalhamento

Após os ensaios de flexão, as quatro vigas tiveram seus apoios removidos a uma distância de 10 cm do final do entalhe, assim como o restante das vigas que não foram ensaiadas, totalizando 23 amostras. Todos os entalhes foram então submetidos ao ensaio de resistência ao cisalhamento, realizado por meio de um ensaio à flexão com distância entre apoios muito curta. Devido às condições e montagem do ensaio, a flexão atua como cisalhamento nas peças.

Por seguirem as dimensões mínimas de entalhes recomendadas pela NBR 7190/97, os corpos de prova diferiram do padrão estabelecido para o ensaio de cisalhamento. Como os entalhes foram realizados em vigas, as fibras ficaram na horizontal, o oposto do corpo de prova padrão da NBR 7190/97.

Os ensaios foram realizados em uma prensa EMIC modelo DL 30000N, com os entalhes voltados para cima e as extremidades apoiadas, com a carga atuando diretamente na região do entalhe e perpendicularmente à direção das fibras, como mostra a Figura 7.

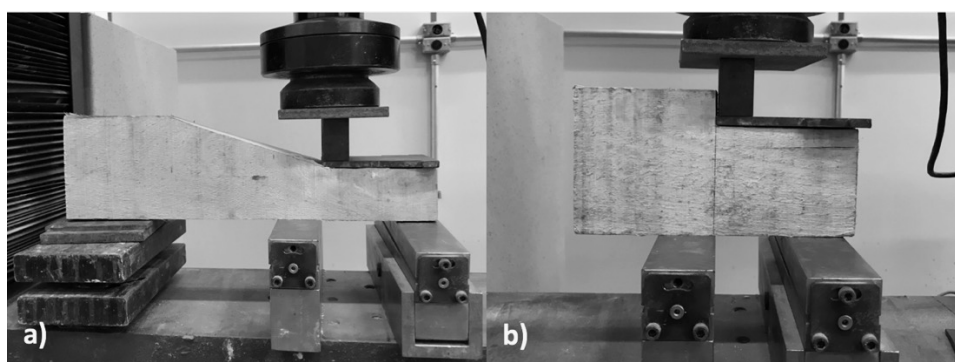


Figura 7 – Posicionamento das peças para o ensaio de cisalhamento: a) entalhe misulado; b) entalhe reto.

Após a realização dos ensaios, foram calculadas as resistências médias de cada espécie e cada tipo de entalhe. Como não foi feita caracterização das peças para simular uma situação real de utilização, os valores de umidade foram estimados a partir da Equação (3).

$$f_{12} = f_{U\%} \left[1 + \frac{3.(U\% - 12)}{100} \right] \quad (3)$$

Onde f_{12} corresponde à resistência média a 12% de umidade e $f_{U\%}$ é a resistência a U% de umidade. Utilizou-se o valor de $f_{U\%}$ como sendo a resistência média característica obtida nos ensaios. Desse modo, estimou-se a umidade U% das peças.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados e as análises referentes aos ensaios realizados. Procurou-se avaliar a resistência ao cisalhamento com a presença de entalhes em vigas, bem como a influência da direção das fibras.

4.1 Resistência à flexão simples

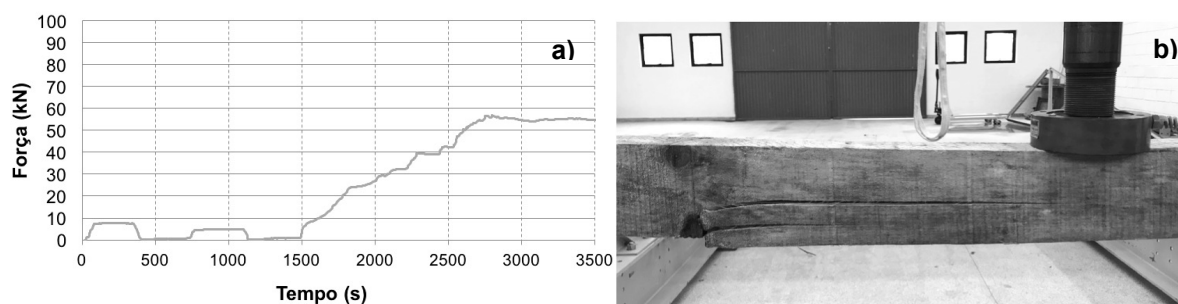
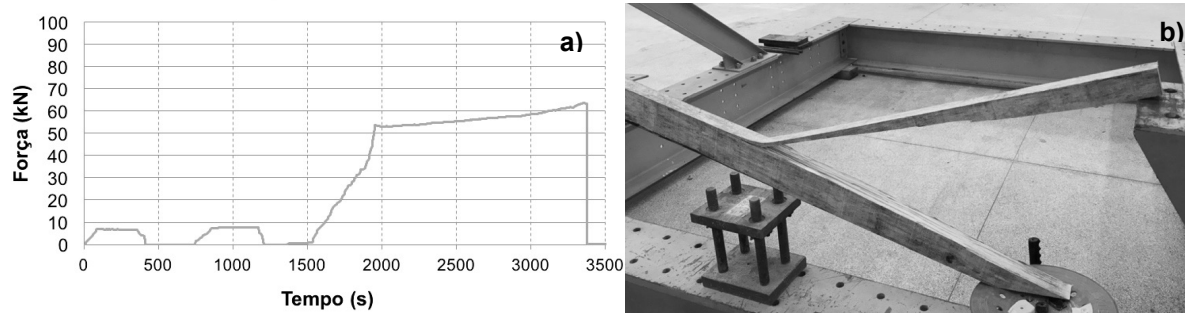
Os resultados obtidos a partir do ensaio de resistência à flexão simples são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados obtidos a partir do ensaio de resistência à flexão simples

Viga	Espécie	Tipo de Entalhe	Força Máxima	Deslocamento
AM03	Araucária	Misulado	63,64 kN	- ¹
AR01	Araucária	Reto	56,77 kN	3,5 cm
EM01	Eucalipto	Misulado	131,43 kN	5,5 cm
ER01	Eucalipto	Reto	139,46 kN	5,5 cm

¹A viga AM não foi medida pois sua ruptura levou à queda da peça.

Nas Figuras 8 a 11 são apresentadas as séries temporais de forças dos ensaios de flexão simples das quatro vigas junto a fotos do momento de ruptura de cada uma.



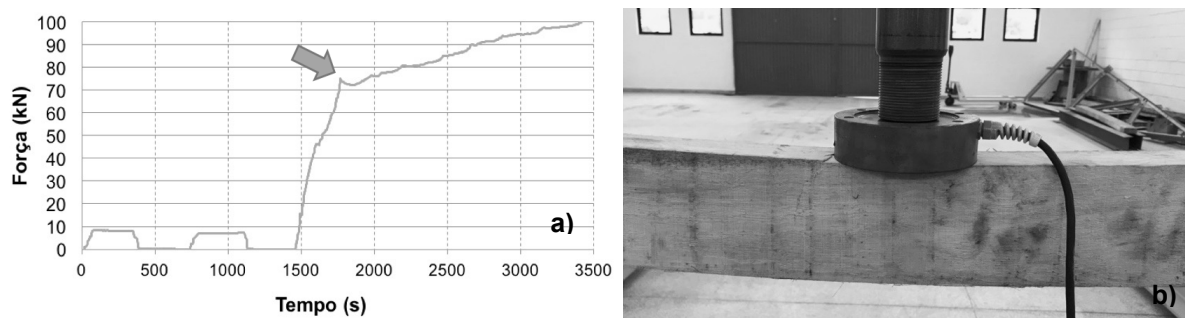


Figura 10 – a) Séries temporais de forças – Ensaio de flexão simples da viga EM01; b) Ruptura da viga EM01

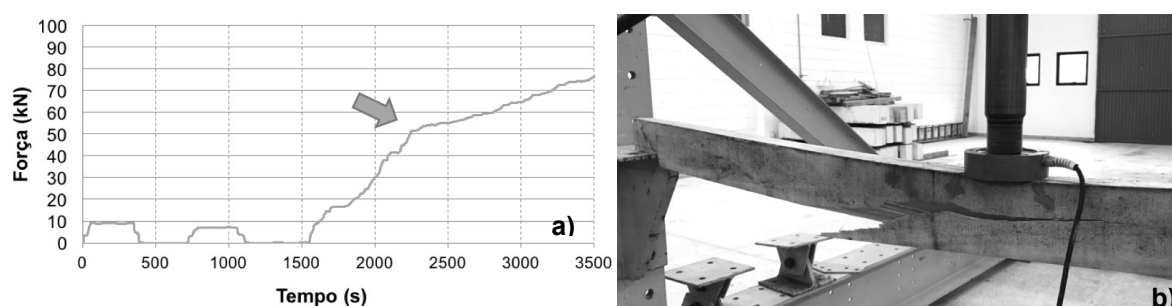


Figura 11 – a) Séries temporais de forças – Ensaio de flexão simples da viga ER01; b) Ruptura da vida ER01

Como é possível observar nas Figuras 9 a 11, houve aleatoriedade nos modos de ruptura. No caso das vigas de Araucária, teve-se ruptura frágil por fendilhamento, na viga AM03 (Figura 9b), enquanto a viga AR01 rompeu devido à presença de um nó na parte inferior, o que provocou o fendilhamento do material (Figura 11b), ambos na direção perpendicular ao carregamento e paralela às fibras. Já nas vigas de Eucalipto, as rupturas ocorreram por compressão e esmagamento das fibras superiores, com característica de flambagem (Figuras 13b e 15b).

Nas peças de Eucalipto, a diminuição da rigidez foi considerável e facilmente identificada nos gráficos pela mudança de direção da curva (indicada por uma seta) a partir de 70kN, para o entalhe misulado (Figura 10a), e 50 kN, para o entalhe reto (Figura 11a). Isso indica que as vigas de Eucalipto saíram do regime elástico apesar de ainda absorverem esforços, apresentando trechos de rigidez diferentes.

Não houve ruptura por cisalhamento em nenhum dos apoios monitorados, confirmando a maior fragilidade das vigas à flexão simples do que ao corte nas extremidades entalhadas. Além disso, confirmou-se a maior segurança dos entalhes misulados em relação aos retos, com uma diferença de resistência para o entalhe reto de quase 70kN para as vigas de Araucária e de mais de 80kN para as vigas de Eucalipto.

4.1 Resistência ao cisalhamento

Os resultados obtidos a partir do ensaio de resistência ao cisalhamento são apresentados na Figura 12.

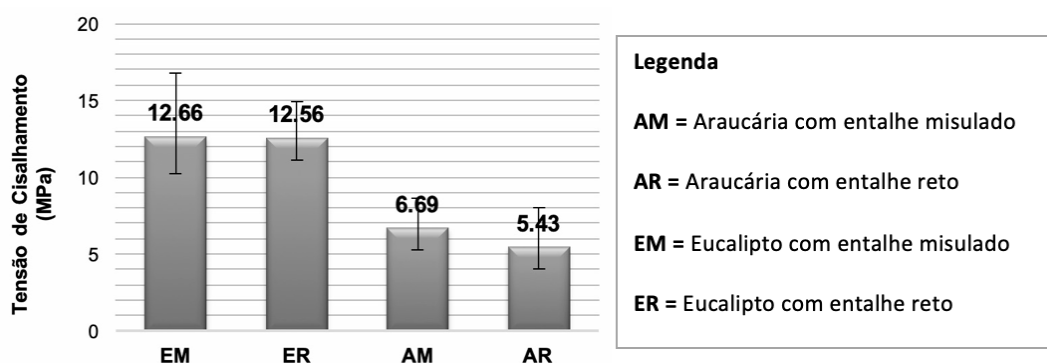


Figura 12 – Resultados de resistência ao cisalhamento

Assim como nos ensaios de flexão simples (Tabela 1), observou-se uma maior resistência nas peças de Eucalypto se comparadas às de Araucária. Já no caso dos entalhes, os do tipo misulado suportam maiores tensões cisalhantes do que os do tipo reto. Nas Figuras 13 a 20 são apresentados os diagramas de tensões normais dos ensaios de cisalhamento, separados por espécie e tipo de entalhe, seguidas de fotos de corpos de prova no momento da ruptura.

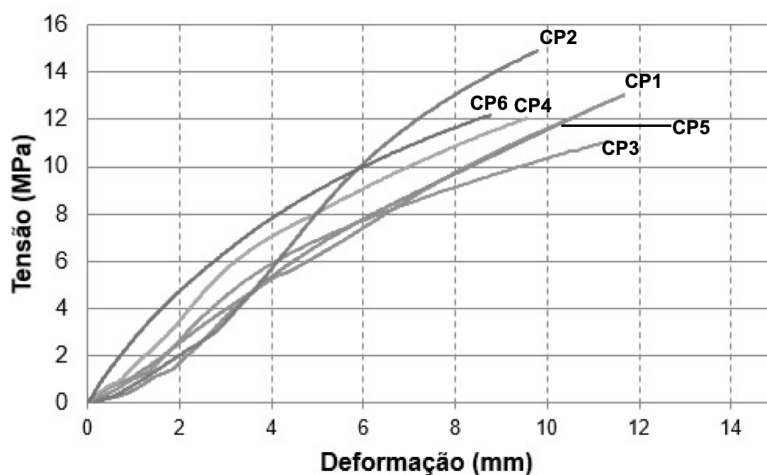


Figura 13 – Diagrama de tensões normais dos ensaios de cisalhamento – Eucalypto com entalhe reto (ER)

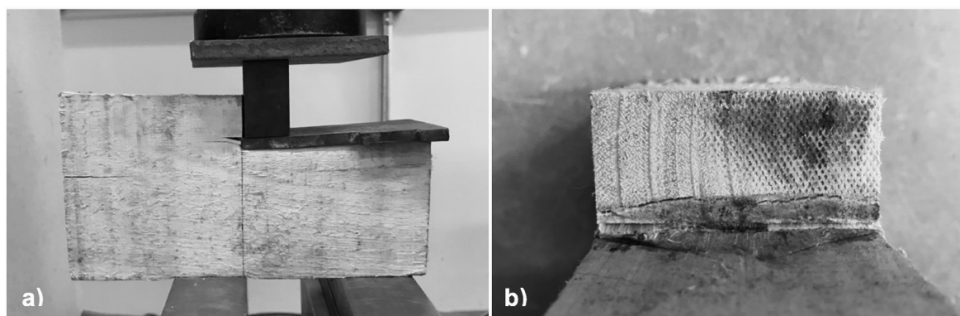


Figura 14 – Corpo de prova 3: a) momento da ruptura; b) fissuras no entalhe

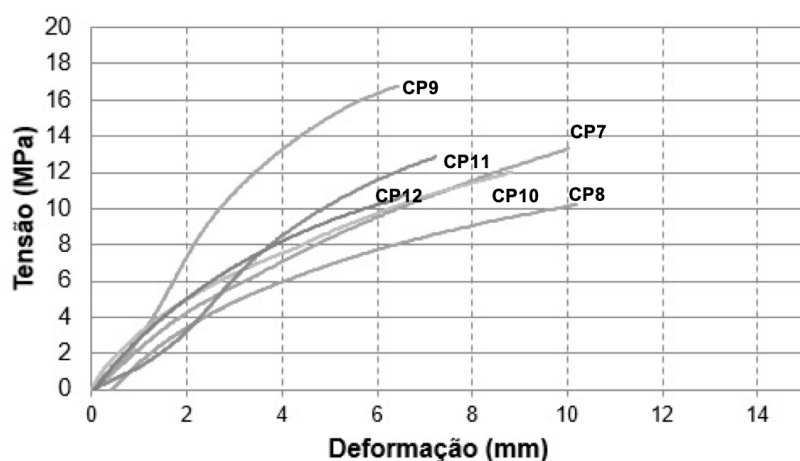


Figura 15 - Diagrama de tensões normais dos ensaios de cisalhamento - Eucalipto com entalhe misulado (EM)

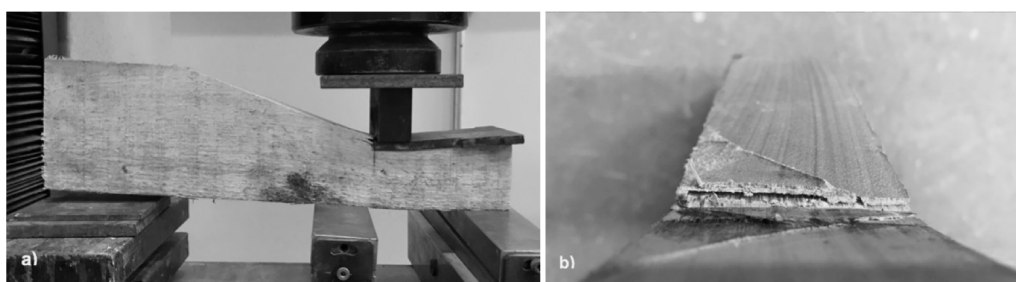


Figura 16 – Corpo de prova 7: a) momento da ruptura; b) fissuras no entalhe

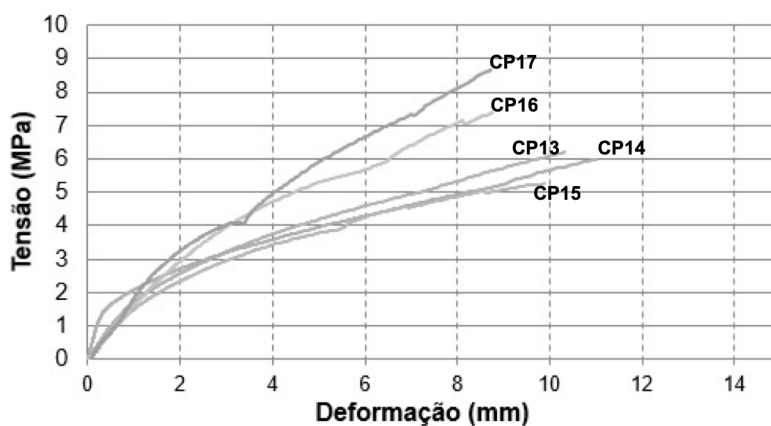


Figura 17 – Diagrama de tensões normais dos ensaios de cisalhamento – Araucária com entalhe misulado (AM)

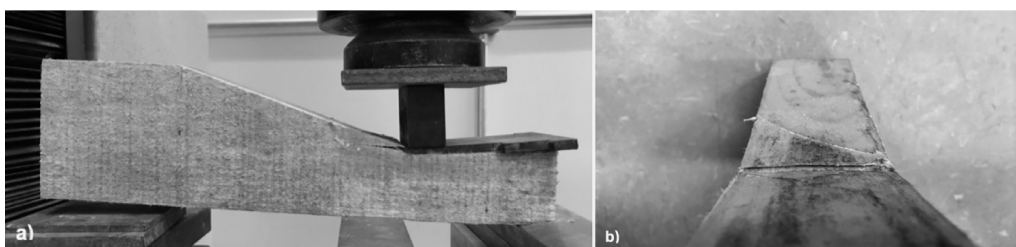


Figura 18 – Corpo de prova 14: a) momento da ruptura; b) fissuras no entalhe

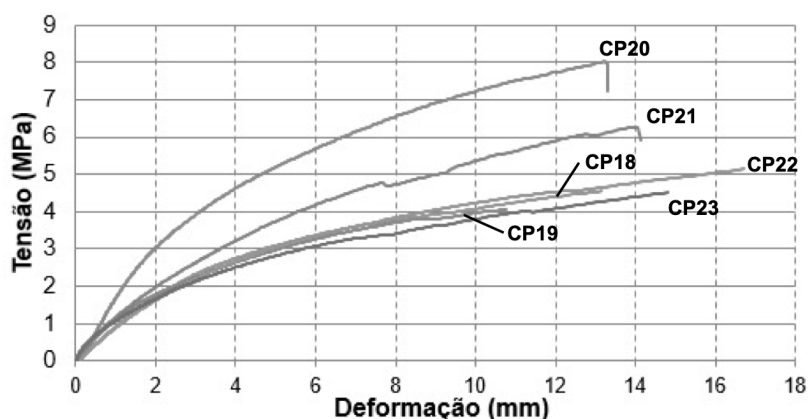


Figura 19 - Diagrama de tensões normais dos ensaios de cisalhamento – Araucária com entalhe reto (AR)

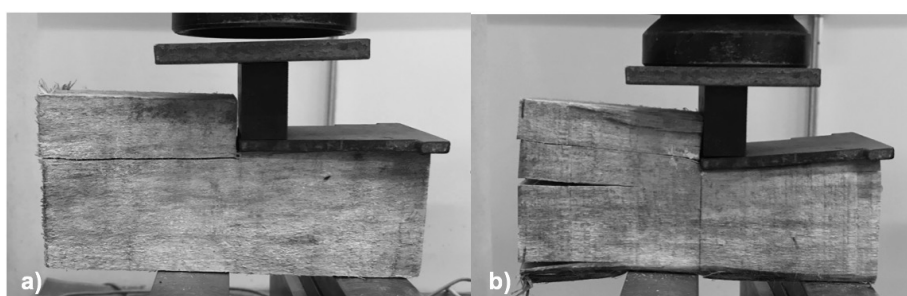


Figura 20 – Momento da ruptura: a) Corpo de prova 20; b) Corpo de prova 21

Quanto aos modos de ruptura, observou-se que em todos os corpos de prova o material procurou um plano de cisalhamento na direção das fibras, ou seja, na direção perpendicular à da força aplicada (Figuras 14, 16, 18 e 20). A ruptura ocorrendo na mesma direção que o ensaio proposto pela NBR 7190/97 indica que o dimensionamento ao cisalhamento deve continuar sendo feito a partir da resistência no plano longitudinal, e não perpendicular às fibras.

De modo geral, as peças de Eucalipto resistiram de 80% a 90% a mais do que as de Araucária, sendo os corpos de prova com entalhe misulado os mais resistentes, com média de aproximadamente 17 MPa. Os entalhes retos de Araucária obtiveram as menores resistências, com uma média em torno de 8 MPa, e as rupturas horizontais mais visíveis (Figura 20).

Nas Figuras 14, 16, 18 e 20 também é possível visualizar que o plano de ruptura dos corpos de prova deu-se na direção das fibras, iniciando em quase todos os casos na quina do entalhe. Desse modo, pode-se afirmar que o ponto com maior concentração de tensões e, portanto, origem do plano de cisalhamento e ruptura, é a aresta do entalhe.

Os corpos de prova que já haviam sido submetidos à flexão simples anteriormente (corpos de prova 1, 2, 7, 8, 17, 19 e 20) não diferiram dos outros em nenhum aspecto. Pode-se afirmar que o cisalhamento nos apoios provocado pela flexão simples das vigas não afeta a

capacidade de carga das peças entalhadas, visto que não chega a atingir valores próximos da ruptura, pois permanece no intervalo elástico linear.

Os valores de resistência ao cisalhamento obtidos variaram de aproximadamente 4 MPa (Araucária com entalhe reto) até mais de 16 MPa (Eucalipto com entalhe misulado). Calculou-se a média dos resultados e multiplicou-se o resultado por 0,7 a fim de obter os valores característicos, conforme determinado pela NBR 7190/97. Esses valores foram utilizados para o cálculo da estimativa de umidade das peças. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de resistência ao cisalhamento médios e característicos obtidos

Espécie	Entalhe	Nº CP ¹	Resistência Média (MPa)	Resistência Característica (MPa)	Resistência NBR 7190 (MPa)
Eucalipto	Reto	6	12,56	8,79	5
Eucalipto	Misulado	6	12,66	8,86	5
Araucária	Reto	6	4,06	2,84	6
Araucária	Misulado	5	5,26	3,68	6

¹Número de corpos de prova

Os valores característicos de cisalhamento estipulados pela norma brasileira para coníferas e dicotiledôneas de classe C30 são 6 MPa e 5 MPa, respectivamente (Tabelas 8 e 9 da NBR 7190/97). Esses valores são referentes à condição padrão de 12% de umidade. Para fins de comparação, estimou-se a umidade média das peças entalhadas por meio da Equação (3), que relaciona a resistência à 12% de umidade (valor tabelado na NBR 7190/97) com a resistência à umidade U% (valor de resistência característica média obtida nos ensaios). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de umidade calculados

Espécie	Entalhe	Nº CP ¹	f _U % (MPa) ²	f ₁₂ % (MPa) ³	Umidade (%)
Eucalipto	Reto	6	8,79	5	-2,37
Eucalipto	Misulado	6	8,86	5	-2,52
Araucária	Reto	6	2,84	6	49,09
Araucária	Misulado	5	3,68	6	34,53

¹Número de corpos de prova

²Resistência ao cisalhamento com umidade U%

³Resistência ao cisalhamento com umidade a 12%

Os valores de resistência à 12% de umidade (f₁₂%) e à U% de umidade (f_U%) foram substituídos na Equação 4 para obtenção da umidade estimada das peças (U%). A diferença de resistências obtidas para a Araucária pode ser explicada pela sua alta umidade, bem acima

dos 12% utilizado pela norma. Já nas peças de Eucalipto, obteve-se um valor negativo de umidade, não sendo possível nenhuma interpretação física.

Por se tratarem de espécies diferentes de madeira, conclui-se que para o Eucalipto, especificamente, talvez resistência ao cisalhamento seja mais elevada e, por isso, os resultados experimentais difeririam dos valores indicados na NBR 7190/97.

5 CONCLUSÕES

Não foi observada perda de resistência ao cisalhamento nas peças entalhadas previamente submetidas à flexão simples. Fato que pode ser justificado pelo rompimento das vigas ter ocorrido devido à flexão e não ao corte nas extremidades entalhadas. Além disso, os diferentes modos de ruptura nos ensaios à flexão simples indicam o quão heterogêneo é o material. Desse modo, apesar da presença de entalhes gerar um aumento de tensões localizado, o dimensionamento da peça deve ser feito considerando a flexão como esforço principal.

Observou-se também que, mesmo realizando os ensaios de resistência ao cisalhamento na direção perpendicular às fibras, o rompimento das peças entalhadas se deu na direção oposta e naturalmente menos resistente. Ou seja, a força aplicada na vertical foi transmitida para a horizontal, causando o fendilhamento do corpo de prova na direção das fibras do material. Tal fenômeno pode ser explicado pelo Teorema de Cauchy ou Teorema das Tensões Recíprocas. Assim, pode-se afirmar que apesar de ser um material anisotrópico, a madeira apresenta um comportamento semelhante tanto nas situações em que for solicitada ao cisalhamento na direção paralela como perpendicular às fibras, confirmando o Teorema de Cauchy, nesse caso.

Os resultados de resistência ao cisalhamento e umidade estimada dos entalhes indicaram uma grande diferença entre as espécies avaliadas, principalmente na resistência ao cisalhamento, com variação de mais de 85%. Devido à alta umidade (acima de 30%), as peças de Araucária apresentaram valores de resistência inferiores aos indicados na NBR 7190/97, enquanto as peças de Eucalipto apresentaram valores superiores. Por esse motivo, a utilização de certas espécies de madeira para solicitações de cisalhamento perpendicular às fibras pode apresentar valores diferentes do estipulado em norma.

Por fim, confirma-se que os critérios recomendados pela NBR 7190/97 para dimensionamento de entalhes são coerentes, visto que se baseiam na resistência ao cisalhamento na direção de menor resistência, ou seja, paralela às fibras.

REFERÊNCIAS

- Almeida, F. A. L. de. (2012) **A madeira como material estrutural – Projeto da estrutura da cobertura de um edifício**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7190 (1997). **Projeto de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro.
- Benoit, Y. ; Legrand, B. ; Tastet, V. (2008) **Guide d’application Eurocode 5 – Calcul des structures en bois**. Paris: Eyrolles.
- Clil Junior, C.; Lahr, F. A. R.; Dias, A. A. (2003). **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. 1ª Edição, Barueri: Manole.
- Cordovil, F. A. B.; Rizzo, I. M. L. (2002). **Vigas entalhadas**. In: VIII Encontro Brasileiro em Madeira e Estruturas de Madeira, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia, Julho.
- Crubilé, P. (2012) **Charpentes en bois – Conception**. Dossier: Techniques de L’ingénieur - École Supérieure du Bois.
- Dos Santos, J. A. (2007) **Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira**. Tese (Doutorado) – Universidade do Minho, Guimarães.
- Gesualdo, F. A. R.; Souza Jr, D. A. (2008) **Entalhes em seções transversais de vigas de madeira por meio de abordagem numérica**. In: XI Encontro Brasileiro em Madeira e Estruturas de Madeira, **Anais...** Londrina, Julho.
- Hibbeler, R. C. (2010). **Resistência dos materiais**. 7ª Edição, São Paulo: Pearson Prentice Hall.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. (2009). **Madeira: Uso sustentável na construção civil**. Vários autores, 2. ed., São Paulo.
- Jockwer, R.; Steiger, R.; Frangi, A. (2014) **State-of-the-art review on approaches for the design of timber beams with notches**. ETH Zurich. Zurique.
- Marques, L. E. M. M. (2008). **O papel da madeira na sustentabilidade da construção**. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.
- Medeiros, R. C. (2010) **Forças em peças de contraventamento de treliças de madeira**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Pfeil, W; Pfeil, M. (2003). **Estruturas de madeira**. 6ª Edição, Rio de Janeiro: LTC.
- Porteous, J.; Kermani, A. (2007) **Structural Timber Design to Eurocode 5**. Oxford: Blackwell Science.
- Rethink Wood. (2014). **Connection Solutions for Modern Wood Buildings**. Engineering News-Record, Outubro.

- Ritter, M. A. (1990) **Timber Bridges: Design, Construction, Inspection and Maintenance**. Manual, 1ª Edição. Washington, Forest Service.
- Trouy-Triboulot, M. C.; Triboulot, P. (2012) **Matériau bois: Structure et caractéristiques**. Dossier: Techniques de L'ingénieur - École Supérieure du Bois, Paris.
- Vieira, M. C. S. (2016). **Efeitos produzidos por variações bruscas em seção transversal de peças estruturais de madeira**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Vieira, M. C. S; Gesualdo, F. A. R. (2016) **Efeitos produzidos por entalhes nos terços extremos do vão de vigas estruturais de madeira**. Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal), v. 25, n. 1.

Experimental research of the influence of notches on shear strength in wood beams

ABSTRACT

Wood is currently considered an ecological alternative to materials that cause severe environmental damage, being increasingly used. However, their heterogeneity and anisotropy make its physical and mechanical properties different in all directions, which should be considered in the design. The Brazilian standard, ABNT NBR 7190/97, recommends that the shear strength value should be taken in the direction parallel to the fibers, which may suggest oversizing of the parts. The present work aims to study the perpendicular shear strength to the fibers in notched beams subjected to simple straight bending and verify if the minimum dimensions required by the norm for the execution of notches can be modified. Beams of two species (*Eucalyptus saligna* and *Araucaria angustifolia*) with rectilinear and mislabeled notches were bent to flexion. The carved pieces were subjected to shear, including the supports of the already tested beams, to compare the strengths obtained in the two situations. Crackings were observed on the notch corner of the samples as well as a horizontal shear rupture plan, even though the shearing test was carried out in a vertical plan. The results showed a great difference of shear strength between the evaluated species and no difference between the pieces previously submitted to simple flexion.

Keywords: Notch, timber beams, notched beams, wood shear.

CONCLUSIONS

No loss of shear strength was observed in the notched pieces previously submitted to simple flexion. This fact can be justified by the fact that the beams broke due to the bending and not to the notches on both sides. In addition, the different breaking modes at the simple

flexion tests indicate how heterogeneous the material is. Thus, despite the presence of notches generating an increase in the localized stress, the sizing of the beam should be done considering flexion as the main stress.

It was also observed that even though the tests of shear strength were carried out perpendicular to the fibers, the breaking of the notched pieces occurred in the opposite and naturally less resistant direction. In other words, the force applied vertically has been transmitted horizontally, causing the samples to crack towards the fibers of the material. This phenomenon can be explained by the Cauchy's theorem or Cauchy stress tensor. Therefore, it can be stated that although the wood is an anisotropic material, it exhibits a similar behavior both in situations where it is subjected to shear loading parallel and perpendicular to the fibers, confirming Cauchy's theorem in this case.

The results of shear strength and estimated humidity of the notches indicated a great difference between the evaluated species, mainly in shear strength, with a variation of more than 85%. Due to the high humidity (above 30%), the Araucária pieces presented resistance values lower than those indicated in the Brazilian standard, NBR 7190/97, while the Eucalyptus pieces had higher values. For this reason, the use of certain species of wood for shear stresses perpendicular to the fibers can present different values from those indicated in the Brazilian standard.

Finally, it is confirmed that the sizing criteria recommended by NBR 7190/97 for notches are coherent since they are based on the shear strength in the direction with lower resistance, which is parallel to the fibers.