

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANA FLÁVIA BAÚ CARNEIRO

**ESTUDO EXPERIMENTAL FÍSICO DA INFLUÊNCIA DE ENTALHES
NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE MADEIRA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2017

ANA FLÁVIA BAÚ CARNEIRO

**ESTUDO EXPERIMENTAL FÍSICO DA INFLUÊNCIA DE ENTALHES
NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE MADEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, Sede Ecoville, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Elisabeth Penner

Coorientador: MSc. Cristofer Bernardi Scremim

CURITIBA

2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTUDO EXPERIMENTAL FÍSICO DA INFLUÊNCIA DE ENTALHES NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE MADEIRA

Por

ANA FLÁVIA BAÚ CARNEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 07 de dezembro de 2017, pela seguinte banca de avaliação:

Profa. Orientadora – Elisabeth Penner, Dra.
UTFPR

Coorientador – Cristofer Bernardi Scremim, MSc.

Profa. Christine Laroca
UTFPR

Gustavo Macioski
UTFPR

Felipe Perretto
UTFPR

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha orientadora, Profa. Dra. Elisabeth Penner, por toda disponibilidade e dedicação, fazendo eu me encantar ainda mais com esse material incrível que é a madeira.

A Profa. Christine Laroca e ao Prof. Marcelo Varisco, pelo importante auxílio na execução dos entalhes.

Aos técnicos dos laboratórios do DACOC, Felipe e Gustavo, pela cordialidade na realização dos ensaios necessários.

A minha família, por todo incentivo durante todas as etapas dessa trajetória.

Ao meu namorado Mateus, pelo apoio constante e tão especial sempre. Sua companhia foi essencial para a concretização desse projeto.

RESUMO

CARNEIRO, Ana F. B. Estudo experimental físico da influência de entalhes na resistência ao cisalhamento de vigas de madeira. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

A madeira é atualmente considerada uma alternativa ecológica a materiais que provocam danos ambientais severos, sendo cada vez mais utilizada principalmente devido à conscientização dos profissionais quanto ao seu potencial construtivo e suas vantagens tanto estruturais como ambientais. Entretanto, a ausência de projetos estruturais adequados e carência de mão-de-obra especializada leva à necessidade de se recorrer a estudos científicos que possibilitem a utilização da madeira de forma eficiente e produtiva. 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. Por questões de segurança, a NBR 7190/97 determina que o valor de resistência ao cisalhamento deve ser tomado na direção paralela às fibras, o que pode ocasionar o superdimensionamento das peças. O presente trabalho tem como objetivo estudar 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 atualizadas. Foram ensaiadas à flexão vigas de madeira de duas 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 dos corpos de prova na quina do entalhe, bem como ruptura no plano horizontal. Os resultados apontaram grande diferença de resistência ao cisalhamento entre as espécies avaliadas e nenhuma diferença entre as peças previamente submetidas à flexão simples.

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

ABSTRACT

CARNEIRO, Ana F. B. Physical experimental study of the notch influence in the shear strength of wood beams. 55f. Term paper. Graduate in Civil Engineering, Federal University of Technology - Paraná. Curitiba, 2017.

Wood is currently considered an ecological alternative to materials that cause severe environmental damage, being increasingly used mainly due to the professionals' awareness of its constructive potential and its structural and environmental advantages. However, the absence of adequate structural projects and a shortage of skilled labor leads to the need to use scientific studies that make it possible to use wood efficiently and productively. Their heterogeneity and anisotropy make its physical and mechanical properties different in all directions, which should be considered in the design. For safety reasons, the Brazilian standard, ABNT NBR 7190/97, determines that the shear strength value should be taken in the direction parallel to the fibers, which may lead to 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 updated. Wood 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 rupture 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.

Key-words: Notch, timber beams, notched beams, wood shear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos mais comuns de entalhes.....	18
Figura 2 - Detalhes de ligações entalhadas em estruturas de madeira.....	19
Figura 3 - Entalhe para ligação de peças de cobertura.....	19
Figura 4 - Entalhe para ligação viga-pilar.....	20
Figura 5 - Detalhe de ligação entre banzos de uma treliça de cobertura.....	21
Figura 6 - Detalhes da interseção de troncos de madeira na construção de paredes.....	21
Figura 7 - Entalhe na forma de cauda de andorinha: a) reconstituição da ligação realizada no século XII; b) ligação realizada atualmente.....	21
Figura 8 - Detalhe da interseção de troncos para construção de paredes.....	22
Figura 9 - Eixos principais da madeira em relação à direção das fibras.....	22
Figura 10 - Componentes da tensão cisalhante.....	23
Figura 11 - Distribuição da tensão de cisalhamento em uma seção transversal.....	23
Figura 12 – Equilíbrio de tensões cisalhantes dada pela propriedade complementar do cisalhamento.....	24
Figura 13 - Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira.....	25
Figura 14 - Ilustração das tensões cisalhantes de acordo com a direção das fibras da madeira.....	25
Figura 15 - Corpo de prova para ensaio de flexão.....	25
Figura 16 - Cisalhamento transversal (a) paralelo às fibras; (b) transversal às fibras.....	25
Figura 17 – Viga biapoiada com carga distribuída: a) esquema estático; b) diagrama de força cortante; c) diagrama de momento fletor; d) estrutura deformada com esforços internos.....	26
Figura 18 - Fissuras geradas na quina do entalhe devido à concentração de tensões de tração perpendiculares às fibras da madeira.....	27
Figura 19 - Variação da tensão tangencial em função da altura e largura do entalhe.....	27
Figura 20 - Entalhes em vigas: a) na região do apoio; b) fora do apoio.....	29
Figura 21 - Pormenores construtivos em vigas entalhadas: (a) entalhe com parafuso vertical; (b) entalhe com mísula.....	29
Figura 22 - Dimensões das vigas para o ensaio.....	30
Figura 23 - Detalhe do posicionamento do apoio no ensaio a flexão.....	31
Figura 24 - Equipamentos utilizados para a confecção dos entalhes: a) serra; b) formão.....	31
Figura 25 - Vigas com entalhes finalizados.....	32

Figura 26 - Diagrama de carregamento para ensaio de flexão	33
Figura 27 - Posicionamento da viga para ensaio de resistência à flexão simples.....	33
Figura 28 - Detalhe no apoio do entalhe para ensaio de flexão simples	34
Figura 29 - Corpos de prova para ensaio de cisalhamento.....	34
Figura 30 - Posicionamento das peças para o ensaio de cisalhamento: a) entalhe misulado; b) entalhe reto.	35
Figura 31 - Representação das áreas de cisalhamento dos corpos de prova.....	35
Figura 32 - Séries Temporais de Forças - Ensaio de Flexão Simples - Viga AM03..	37
Figura 33 - Ruptura da viga AM03	38
Figura 34 - Séries Temporais de Forças - Ensaio de Flexão Simples - Viga AR01 ..	38
Figura 35 - Ruptura da viga AR01	39
Figura 36 - Séries Temporais de Forças - Ensaio de Flexão Simples - Viga EM01 ..	39
Figura 37 - Ruptura da viga EM01	40
Figura 38 - Séries Temporais de Forças - Ensaio de Flexão Simples - Viga ER01 ..	40
Figura 39 - Ruptura da viga ER01	40
Figura 40 - Resultados de resistência ao cisalhamento	41
Figura 41 - Diagrama de tensões normais dos ensaios de cisalhamento - Eucalipto com entalhe reto (ER).....	42
Figura 42 – Amostra 3: a) momento da ruptura; b) fissuras no entalhe	42
Figura 43 - Diagrama de tensões normais dos ensaios de cisalhamento - Eucalipto com entalhe misulado (EM)	43
Figura 44 – Amostra 7: a) momento da ruptura; b) fissuras no entalhe	43
Figura 45 - Diagrama de tensões normais dos ensaios de cisalhamento - Araucária com entalhe misulado (AM)	44
Figura 46 – Amostra 14: a) momento da ruptura; b) fissuras no entalhe	44
Figura 47 - Diagrama de tensões normais dos ensaios de cisalhamento - Araucária com entalhe reto (AR)	45
Figura 48 - Momento da ruptura: a) Amostra 20; b) Amostra 21	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados obtidos a partir do ensaio de resistência à flexão simples.....	37
Tabela 2 - Valores de resistência ao cisalhamento médios e característicos obtidos.....	46
Tabela 3 - Valores de umidade calculados	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a	Largura do entalhe
b	Largura da seção transversal
CP	Corpo de prova
F_m	Resistência média à flexão
$F_{m,est}$	Resistência média à flexão estimada
f_{12}	Resistência
$f_{v0,d}$	Resistência ao cisalhamento na direção paralela às fibras
$f_{u\%}$	Resistência média a U% de umidade
h	Altura da seção transversal
h_1	Altura do entalhe
τ_d	Tensão de cisalhamento máxima
$U\%$	Umidade
V_d	Esforço cortante

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVO GERAL	13
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.3	JUSTIFICATIVA.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	HISTÓRICO SOBRE TÉCNICAS DE CARPINTARIA	15
2.2	TIPOS CLÁSSICOS DE ENTALHES	17
2.2.1	Aplicações	20
2.3	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL.....	22
2.3.1	Tensões de cisalhamento em vigas entalhadas	26
2.4	CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE ACORDO COM A NBR 7190/1997	28
3	METODOLOGIA.....	30
3.1	VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS	30
3.2	CONFECÇÃO DOS ENTALHES.....	30
3.3	ENSAIOS.....	32
3.3.1	Ensaio de Resistência à Flexão Simples	32
3.3.2	Ensaio de Resistência ao Cisalhamento.....	34
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	37
4.1	RESISTÊNCIA À FLEXÃO SIMPLES.....	37
4.2	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	41
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
	REFERÊNCIAS.....	49
	APÊNDICE A	53

1 INTRODUÇÃO

Material de importância histórica para o desenvolvimento da humanidade, a madeira é atualmente 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, 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 principalmente 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, seja utilizando-o de um modo diferente, seja empregando técnicas antigas de forma distinta (ALMEIDA, 2012; TROUY-TRIBOULOT; TRIBOULOT, 2012).

Apesar da grande quantidade de coberturas executadas em madeira 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. Ainda assim, 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. Sua textura e cor a tornam um material esteticamente agradável, o que aliado à liberdade de escolha permite aos projetistas uma infinidade de soluções construtivas (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 e a idealização da

estrutura por carpinteiros, enquanto a carência de mão-de-obra especializada leva à necessidade de se 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 ruptura no cisalhamento ocorre pelo deslizamento entre fibras adjacentes à seção de corte, sendo a resistência ao cisalhamento definida a partir do seu valor longitudinal, paralelo às fibras. (PFEIL; PFEIL, 2003).

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

1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo estudar a resistência ao cisalhamento de vigas entalhadas submetidas à flexão simples reta.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para cumprimento do objetivo do estudo são propostos os seguintes itens:

- Identificar diferentes configurações de entalhes mais usuais em

construções com finalidade residencial;

- Avaliar a eventual perda de resistência ao cisalhamento na região de entalhes de vigas conforme diferentes configurações;
- Comparar duas espécies de madeira, uma conífera e outra dicotiledônea, para realização dos ensaios;
- Realizar ensaios de flexão simples reta em vigas entalhadas de madeira (conforme critérios da NBR 7190/97) das duas espécies selecionadas;
- Realizar ensaios de cisalhamento (conforme critérios da NBR 7190/97) nos entalhes das vigas submetidas à flexão simples e em entalhes não submetidos à flexão;
- Comparar os resultados obtidos com os critérios recomendados pela NBR 7190/97.

1.3 JUSTIFICATIVA

Por questões de segurança, a NBR 7190/97 determina que o valor de resistência ao cisalhamento deve ser tomado na direção paralela às fibras mesmo nos casos em que a solicitação ocorre na direção perpendicular, como é o caso de vigas submetidas à flexão. Essa recomendação pode ser justificada por meio do Teorema de Cauchy, o qual afirma que as tensões cisalhantes são iguais em todas as direções.

Devido ao fato de a resistência na direção paralela às fibras ser menor do que a encontrada na direção perpendicular, a menor resistência é utilizada para os cálculos de dimensionamento da NBR 7190/97. Entretanto, não é considerada a anisotropia da madeira, característica que provoca divergências na resposta do material aos esforços em diferentes 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).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste referencial teórico, será feita uma breve abordagem sobre as técnicas de carpintaria, seguida pela apresentação dos tipos de entalhes em estruturas, algumas considerações sobre a resistência ao cisalhamento em madeiras e também as recomendações da NBR 7190/97 para o dimensionamento de entalhes.

2.1 HISTÓRICO SOBRE TÉCNICAS DE CARPINTARIA

Considerado por muitos séculos como o artífice mais importante da construção, o carpinteiro estabeleceu-se historicamente através da utilização da madeira como matéria-prima para a construção civil, sendo o responsável pelo desenvolvimento de uma das artes mais antigas do mundo (SOUSA, 2014).

A consolidação do conhecimento sobre o comportamento da madeira como material estrutural permitiu que a partir da Idade Média fossem realizadas estruturas que mesmo após séculos de construção mantêm até hoje sua qualidade e desempenho, comprovando as qualidades intrínsecas da carpintaria tradicional (FIGUEIREDO; CARRASCO, 2015).

Essas técnicas tradicionais, juntamente com os processos criativos e a prática dos carpinteiros compõem um patrimônio cultural construído ao longo de séculos com a colaboração dos nativos, que detinham conhecimento sobre as madeiras nativas, e também dos colonizadores, que possuíam conhecimento técnico de cortes e entalhes (GONZAGA, 2005 *apud* FIGUEIREDO; CARRASCO, 2015).

Em todos casos o processo de aprendizado da carpintaria é dado a partir da experimentação, da repetição e do aprimoramento. O artífice antecipa o produto final, fazendo o dimensionamento das peças a partir da experiência acumulada. Por esse motivo, as técnicas tendem a permanecer imutáveis e estreitamente vinculadas às tradições da cultura onde se localizam (PIMENTA *et al.*, 2012).

No Brasil, entre os séculos XVII e XVIII, a carpintaria tinha um papel essencial na construção civil, sendo muito utilizada principalmente pela abundância de matéria-prima e também pela facilidade de aprendizado e transmissão de conhecimento das técnicas pelos artífices (FIGUEIREDO; CARRASCO, 2015). Um dos principais incentivos para o desenvolvimento da carpintaria apontado por

Pimenta *et al.* (2012) foi a utilização da madeira como material de construção nas zonas rurais.

Até fins do século XIX, o ofício da carpintaria era também responsável por grande parte do maquinário utilizado no Brasil (KATINSKY, 1967). Nessa mesma época, registros físicos em forma de manuais eram publicados a fim de ilustrar as técnicas construtivas empregadas, destacando-se os detalhamentos de encaixes entre as peças de madeira, chamadas de sambladuras ou entalhes (FIGUEIREDO; CARRASCO, 2015).

Essas técnicas de recorte variam em complexidade de acordo com a necessidade identificada pelo artífice, que muitas vezes chega em soluções únicas criadas a partir de suas habilidades adquiridas com a experiência. Por esse motivo, a carpintaria inclui não somente uma parcela técnica como também uma intelectual, responsável pela concepção de soluções que garantam a rigidez, eficiência e durabilidade da estrutura (FIGUEIREDO; CARRASCO, 2015).

Desse modo, a carpintaria tradicional é definida, segundo Figueiredo e Carrasco (2015), como uma prática autônoma, na qual o mestre-carpinteiro se fundamenta em sua própria experiência e em seus próprios conhecimentos para tomar as decisões construtivas, em um contexto de ausência de formalidades projetuais, centralizando as funções de concepção e execução na figura do mestre-carpinteiro.

Esse domínio do trabalho pela destreza do homem é apontado por Pimenta *et al.* (2012) como a principal diferença entre a produção artesanal e a industrial, sendo a exclusividade e a imprevisibilidade do trabalho manual suas principais características, originadas do aperfeiçoamento continuado dos artesãos. Com a substituição das habilidades artesanais pelas máquinas, o conhecimento empírico acumulado não constituía mais a via de formação de mão de obra na carpintaria, uma vez que a operação das máquinas podia ser feita por pessoas sem conhecimento algum das técnicas artesanais (SOUSA, 2014).

Atualmente, a manutenção e transmissão desse ofício encontram muitos obstáculos, principalmente devido à atribuição de um papel muito restrito ao carpinteiro, o de mero montador, e não mais construtor. Por esse motivo, a carpintaria perdeu suas principais características, a engenhosidade e a autonomia (FIGUEIREDO; CARRASCO, 2015).

Outro fator relevante para a modificação do ofício do carpinteiro foi a introdução de normas técnicas para a construção de estruturas de madeira, o que delimitou muito o trabalho do artífice, eliminando toda e qualquer forma de experimentação. Apesar da padronização e adequação exigidas, as ligações irregulares produzidas autonomamente pelos carpinteiros não levaram as estruturas antigas ao colapso, confirmando o conservadorismo da NBR 7190/97, principalmente quanto aos coeficientes de segurança (FIGUEIREDO; CARRASCO, 2015).

Além disso, a introdução de novos materiais e técnicas também contribuiu muito para a alteração da prática da carpintaria (FIGUEIREDO; CARRASCO, 2015). De acordo com uma pesquisa de campo efetuada por Pimenta *et al.* (2012) em Santa Catarina, muitos artífices incluíram nas técnicas tradicionais procedimentos modernos a fim de se manter no mercado. E mesmo os profissionais que se detêm à carpintaria tradicional transformaram os materiais e instrumentos, seja pelo desaparecimento de matéria-prima, seja pela praticidade dos equipamentos elétricos atuais. Apesar disso, os autores observam que o resultado final é o mesmo, visto que a técnica utilizada não foi modificada e que as formas de encaixes e ligações permaneceram as mesmas.

Desse modo, é possível identificar a necessidade de aliar a prática tradicional da carpintaria com as normas e exigências técnicas a fim de potencializar o uso da madeira como material estrutural e evitam que a inventividade e autonomia do artífice deem lugar ao tecnicismo e às soluções preconcebidas (FIGUEIREDO; CARRASCO, 2015).

2.2 TIPOS CLÁSSICOS DE ENTALHES

As ligações usadas em estruturas de madeira podem ser divididas em dois grandes grupos: ligações mecânicas e de carpintaria. Dentro delas, existem muitas outras categorias com uma grande quantidade de soluções construtivas. As ligações de carpintaria (*joinery* ou *carpentry connections*) são criadas a partir da execução de entalhes para a conexão e intertravamento das peças (VILELA, 2013).

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. No caso de inversão de esforços, é necessário adicionar um dispositivo complementar no entalhe (um parafuso por exemplo) (PFEIL; PFEIL, 2003). Alguns dos tipos mais comuns de entalhes são ilustrados na Figura 1.

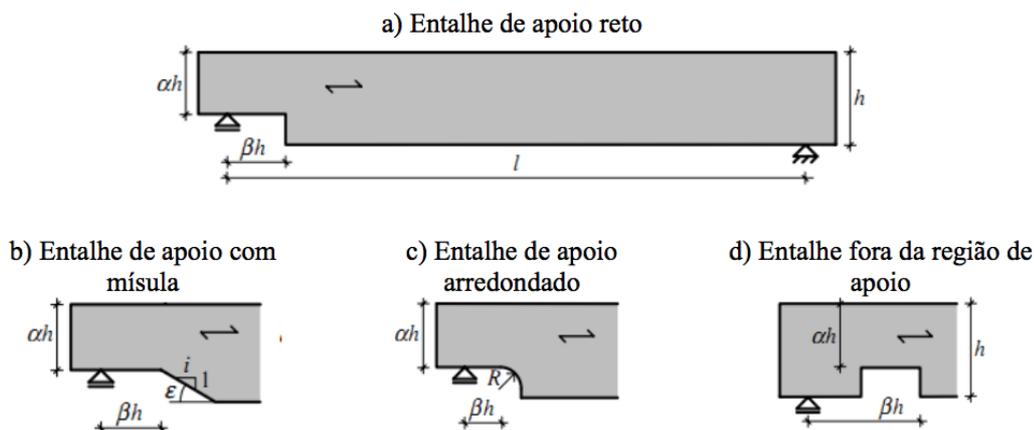


Figura 1 - Tipos mais comuns de entalhes
Fonte: Jockwer, Steiger e Frangi (2014) apud Vieira (2016)

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). Por esse motivo, Pfeil e Pfeil (2003) recomendam que os elementos de ligação tenham resistência e rigidez suficientes para transmitirem forças de uma peça a outra sem prejudicar a estrutura. Além disso, os autores advertem para o deslizamento entre as peças, que deve ser restringido de modo a garantir maior contato.

Segundo Cardão (1969) apud Pereira (2013), pode-se afirmar que os entalhes serão mais resistentes quanto menos complicados forem; pois além de serem de difícil execução, requerem cortes maiores na madeira, diminuindo a seção resistente da peça e, conseqüentemente, enfraquecendo a ligação. Na Figura 2 são ilustrados alguns detalhes de ligações entalhadas em estruturas de madeira.

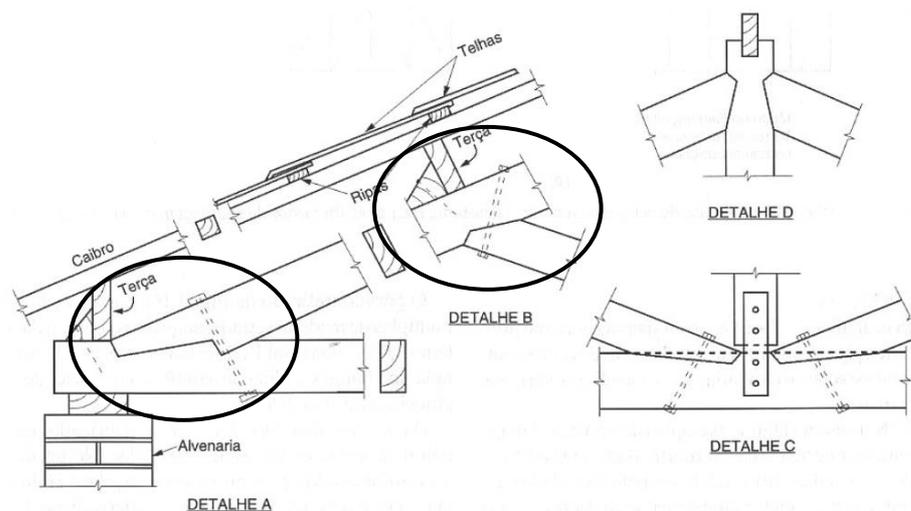


Figura 2 - Detalhes de ligações entalhadas em estruturas de madeira
 Fonte: Adaptado de Pfeil e Pfeil (2003)

Os entalhes, apesar de serem mais comuns em casas térreas, estruturas recreativas e comerciais, também são observados em construções modernas de vários pavimentos. Um dos motivos, segundo reThink Wood (2014), é a necessidade de mão de obra qualificada e a complexidade do trabalho a ser executado, resultando em custos elevados de produção. Apesar disso, Vilela (2013) observa que o uso de entalhes vem sendo recuperado graças à precisão e redução de custos gerados pela pré-fabricação assistida por computador. Algumas aplicações de entalhes tradicionais são apresentadas nas Figuras 3 e 4.



Figura 3 - Entalhe para ligação de peças de cobertura
 Fonte: Vermont Timber Works (2017)



Figura 4 - Entalhe para ligação viga-pilar
Fonte: Madegrande Madeiras (2017)

2.2.1 Aplicações

Os entalhes são observados em diversas situações, algumas delas com maior frequência, como as estruturas de coberturas em madeira. No Brasil, a inserção das estruturas treliçadas de madeira em telhados data do período colonial (início do século XVIII), possibilitada pela chegada dos primeiros exploradores e abundância de matéria-prima. Com a união da estrutura principal (tesouras) com a estrutura secundária (peças que recebem o carregamento proveniente da cobertura e interligam as tesouras), cria-se uma estrutura capaz de suportar esforços e evitar o acúmulo de água sobre as edificações (PEREIRA, 2007).

Para isso, é preciso que as ligações entre todos os seus componentes sejam feitas corretamente, visto que influenciam diretamente no correto funcionamento da estrutura como um todo (PEREIRA, 2007).

O cálculo do esforço de compressão é feito a partir do valor do esforço normal ao plano de contato entre as duas peças (Figura 5), ou seja: $F_2 = F \cdot \sin \alpha$, sendo F a força aplicada, F_2 a componente vertical da força F e α o ângulo entre a força F e o plano horizontal. Por esse motivo, a presença de entalhes nas coberturas não representa uma situação tão crítica como no caso de vigas biapoiadas, nas quais a força F é considerada em sua integridade (PEREIRA, 2007).

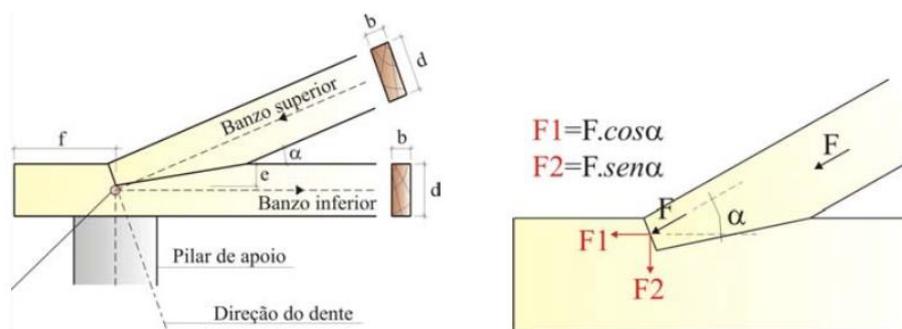


Figura 5 - Detalhe de ligação entre banzos de uma treliça de cobertura
 Fonte: Pereira (2007)

Outro exemplo de utilização de entalhes é para o travamento de paredes, técnica desenvolvida entre os séculos XIII e XV para a construção de casas de madeira. Os troncos eram laminados e chanfrados de modo a possibilitar o encaixe entre as peças (Figuras 6, 7 e 8), garantindo a estabilidade estrutural que esses elementos deveriam ter (ALMEIDA, 2012).

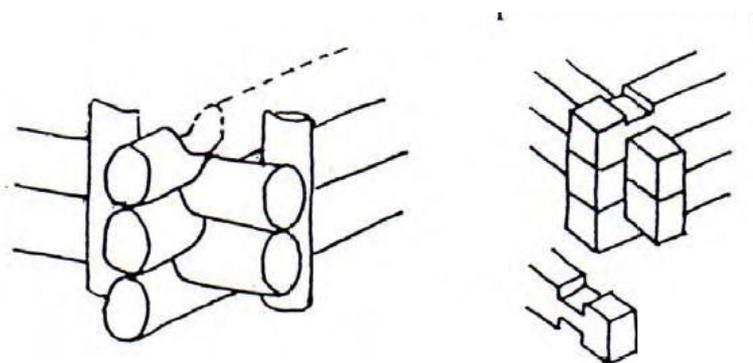


Figura 6 - Detalhes da interseção de troncos de madeira na construção de paredes
 Fonte: Kuklík (2008) *apud* Almeida (2012)

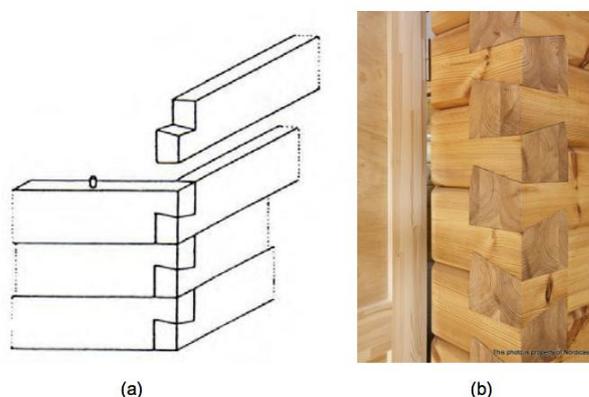


Figura 7 – Entalhe na forma de cauda de andorinha: a) reconstituição da ligação realizada no século XII; b) ligação realizada atualmente
 Fonte: a) Kuklík (2008) *apud* Almeida (2012); b) Nordicasa (2012) *apud* Almeida (2012)

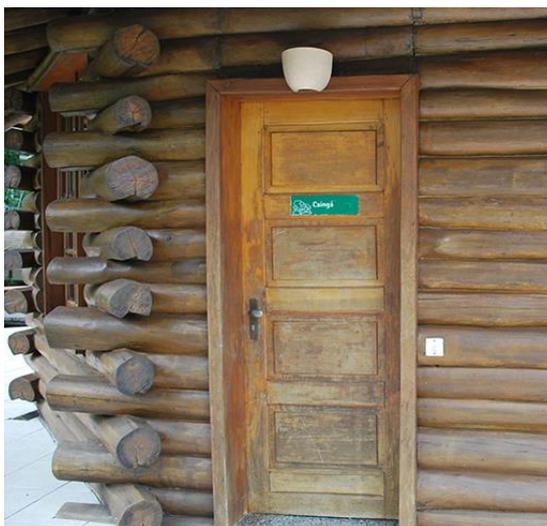


Figura 8 - Detalhe da interseção de troncos para construção de paredes
Fonte: Zuccaratto (2017)

2.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL

Devido à orientação de suas células, a madeira é considerada um material anisotrópico, só podendo 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 9). Na prática, a resistência na direção tangencial é dada como nula, tornando a madeira um material ortotrópico (CRUBILÉ, 2012; PFEIL; PFEIL, 2003).

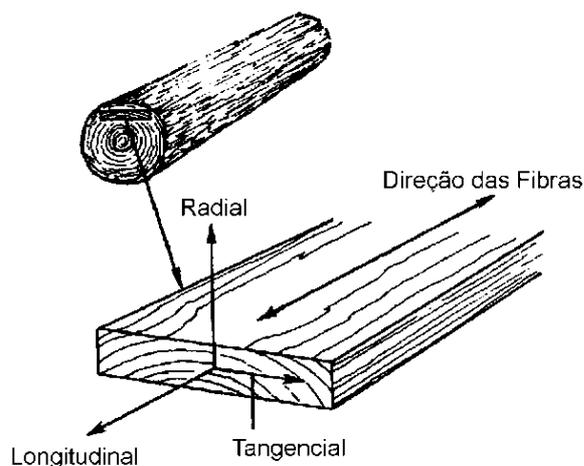


Figura 9 – Eixos principais da madeira em relação à direção das fibras
Fonte: Modificado de Ritter (1990)

O cisalhamento é uma sollicitação encontrada nas vigas que sofrem flexão, especialmente nos apoios, sob cargas pontuais e em entalhes. Ele aparece devido à ação de duas forças de um lado e de outro de um plano e tende a provocar um deslocamento relativo entre as peças. Essa sollicitação 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 biapoiada 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 10). O equilíbrio é atingido quando tensões de valor igual surgem perpendicularmente ao eixo longitudinal (PORTEOUS; KERMANI, 2007 *apud* VIEIRA, 2016).

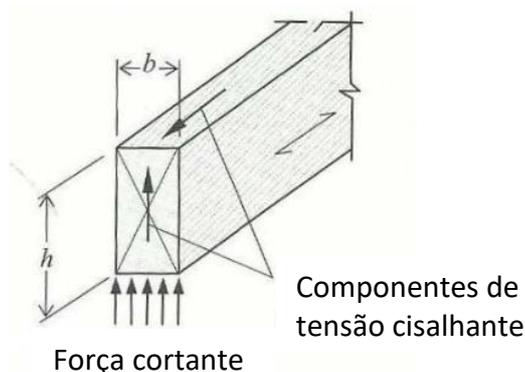


Figura 10 - Componentes da tensão cisalhante
 Fonte: Adaptado de Porteous e Kermani (2007) *apud* Vieira (2016)

Por esse motivo, a tensão de cisalhamento nas faces superior e inferior da seção transversal será nula em qualquer ponto ao longo do comprimento da viga, e a tensão de cisalhamento máxima (τ_d) é atingida na linha neutra, conforme mostra a Figura 11.

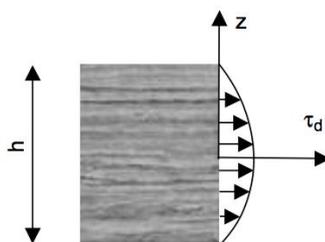
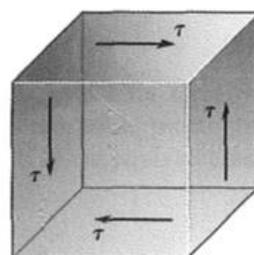


Figura 11 - Distribuição da tensão de cisalhamento em uma seção transversal
 Fonte: Benoit *et al.* (2008)

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” (Figura 12), 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).



Cisalhamento puro

Figura 12 – Equilíbrio de tensões cisalhantes dada pela propriedade complementar do cisalhamento

Fonte: Hibbeler (2010)

De maneira geral, a determinação da resistência mecânica dos materiais deve ser obtida a partir de ensaios mecânicos, normalmente regidos por normas técnicas (SANTOS NETO, 1999). Os valores também podem ser obtidos a partir de valores de resistência fornecidos pela NBR 7190/97, definidos de acordo com a classe da madeira (CALIL JUNIOR, 2006).

No caso dos ensaios de cisalhamento, alguns problemas são pontuados por Lang (1997):

- a) O estado de cisalhamento puro nunca é atingido, pois além das tensões cisalhantes aparecerão tensões normais e ortogonais no plano;
- b) A distribuição de tensões no plano de cisalhamento não é uniforme;
- c) Quando o plano de cisalhamento se desvia da direção das fibras existe uma grande tendência de ruptura à compressão.

Na NBR 7190/97, o valor de resistência ao cisalhamento é obtido ao longo da direção paralela às fibras (Figuras 13 e 14), 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 (Figura 15), o valor da resistência pode ser maior do que o observado na direção paralela às fibras.

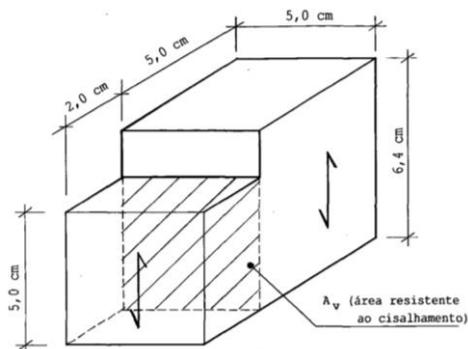


Figura 13 - Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira
Fonte: NBR 7190 (1997)

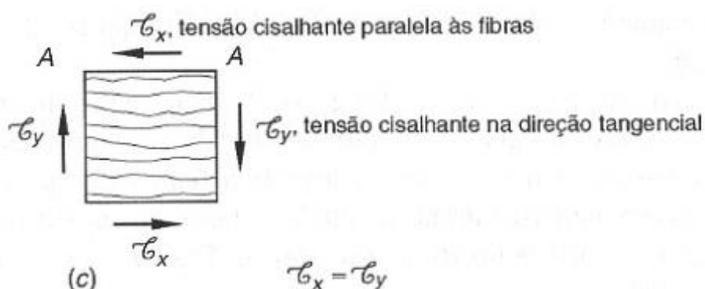
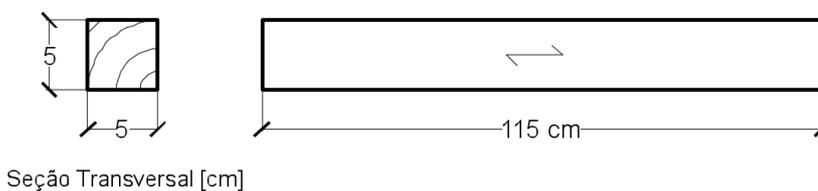


Figura 14 - Ilustração das tensões cisalhantes de acordo com a direção das fibras da madeira
Fonte: Pfeil e Pfeil (2003)



Seção Transversal [cm]

Figura 15 - Corpo de prova para ensaio de flexão
Fonte: Adaptado de NBR 7190 (1997)

Na Figura 16 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.

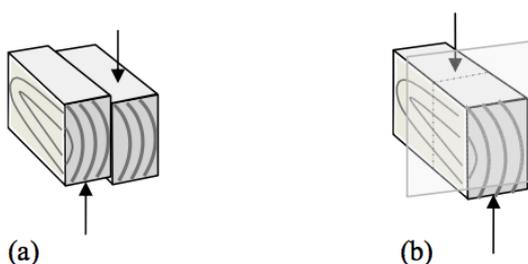


Figura 16 - Cisalhamento transversal (a) paralelo às fibras; (b) transversal às fibras.
Fonte: Dos Santos (2007)

No caso de uma viga biapoiada com carga uniformemente distribuída (Figura 17), o momento fletor máximo ocorre na metade do vão, tendo as fibras mais externas mais solicitadas por tensões normais de tração (na parte inferior) e compressão (na parte superior). Junto aos apoios observa-se a maior solicitação de cisalhamento, ocasionada pela presença da máxima força cortante (CALIL JUNIOR; BRITO, 2010).

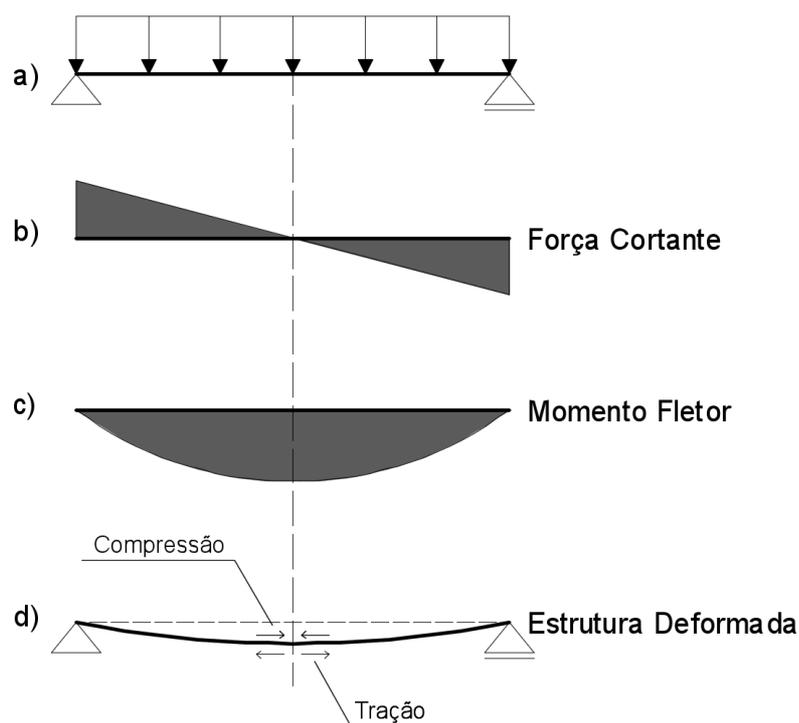


Figura 17 – Viga biapoiada com carga distribuída: a) esquema estático; b) diagrama de força cortante; c) diagrama de momento fletor; d) estrutura deformada com esforços internos

2.3.1 Tensões de cisalhamento em vigas entalhadas

Devido à geometria do entalhe e à anisotropia da madeira, pontos de concentração de tensões são criados na região onde ocorreu mudança significativa de seção transversal, reduzindo consideravelmente a capacidade de carga da peça (JOCKWER; STEIGER; FRANGI, 2014 *apud* VIEIRA, 2016). No caso de vigas biapoiadas, Gesualdo e Souza Jr. (2008) afirmam que a presença de entalhes nos apoios afeta principalmente a tensão cisalhante, enquanto que quando próximos ao vão da viga provocam alterações significativas nas tensões normais e nos deslocamentos.

Segundo Pfeil e Pfeil (2003), as tensões geradas devido à mudança na seção transversal de vigas atuam perpendicularmente às fibras da madeira, nas quinas do entalhe (Figura 18), o que pode provocar o fendilhamento do material, ou seja, a separação das fibras da madeira. Isso pode ocorrer devido à baixa resistência à tração da madeira nesta direção.

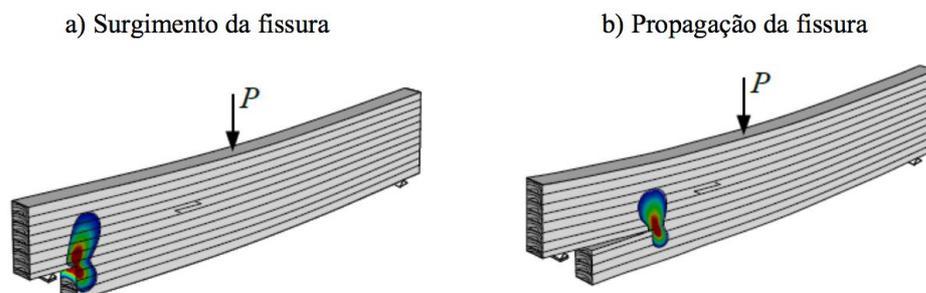


Figura 18 - Fissuras geradas na quina do entalhe devido à concentração de tensões de tração perpendiculares às fibras da madeira
Fonte: Jockwer (2014) *apud* Vieira (2016)

Com a presença de entalhes, as perturbações no fluxo de tensões cisalhantes na região dos apoios da viga causarão variações nas tensões tangenciais, majorando significativamente os carregamentos, como comprovado por Gesualdo e Sousa Jr. (2008). Os autores analisaram a variação da tensão tangencial em função da altura e largura de entalhes próximos aos apoios, de altura h_1 e largura a , de uma viga biapoiada com altura h , e observaram que tanto a altura quanto a largura do entalhe provocam alterações nas tensões cisalhantes, como é mostrado na Figura 19.

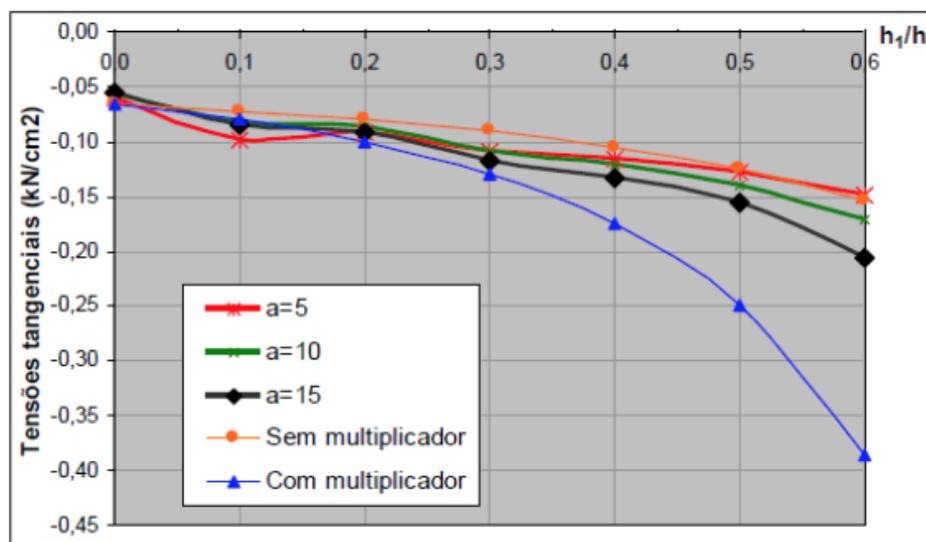


Figura 19 - Variação da tensão tangencial em função da altura e largura do entalhe
Fonte: Gesualdo e Sousa Jr. (2008)

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 (curva azul “Com multiplicador” na Figura 19). 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.

2.4 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 ($f_{v0,d}$). Para uma seção transversal retangular de dimensões b e h solicitada pela força cortante V_d , determina-se a máxima tensão de cisalhamento (τ_d) pela Equação 1.

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

Para uma viga sujeita a forças uniformemente distribuídas, supõe-se que as tensões de cisalhamento mais significativas ocorrerão na região dos apoios, onde se observam os maiores valores de esforços cortantes V_d . Se a viga apresentar um entalhe nessa região os efeitos serão majorados consideravelmente (VIEIRA, 2016).

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 20), pelo fator h/h_1 , com h_1 limitado a $0,75h$ (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 20 - Entalhes em vigas: a) na região do apoio; b) fora do apoio
Fonte: NBR 7190 (1997)

No caso de valores de h_1 menores ou iguais a $0,75h$ a norma recomenda o emprego de parafusos verticais dimensionados à tração axial para a força cortante transmitida (Figura 21a) ou o emprego de mísulas com comprimento maior ou igual a três vezes a altura do entalhe (Figura 21b), respeitando sempre o limite absoluto de $0,5h$.

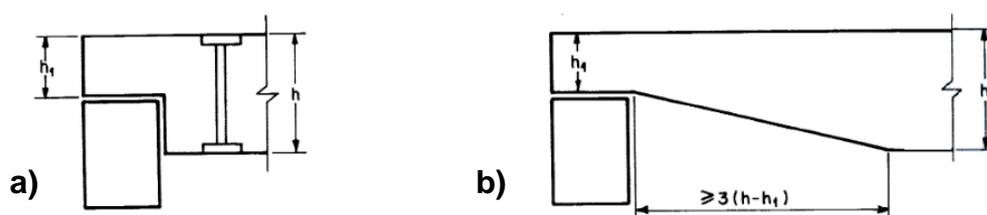


Figura 21 - Pormenores construtivos em vigas entalhadas: (a) entalhe com parafuso vertical; (b) entalhe com mísula
Fonte: NBR 7190 (1997)

A execução de mísulas é realizada a fim de variar a seção transversal gradualmente, evitando, assim, pontos de concentração de tensões. A norma brasileira determina que a máxima inclinação da mísula seja 1:3 (VIEIRA, 2016).

Segundo Vieira (2016), considerar a perturbação no fluxo de tensões causada por entalhes em vigas é fundamental para garantir a o correto dimensionamento da viga e, conseqüentemente, garantir a segurança da estrutura, visto que sua capacidade de carga será consideravelmente afetada.

3 METODOLOGIA

Foram ensaiadas à flexão quatro vigas de madeira de duas espécies com entalhes do tipo reto e misulado. Após o ensaio, os 8 apoios entalhados foram retirados e ensaiados ao cisalhamento, juntamente com os outros 16 entalhes, 8 retos e 8 misulados, de mesmas dimensões, para comparação das resistências obtidas nas duas situações. A seguir, são apresentadas as variáveis experimentais e descritos os métodos e ensaios realizados.

3.1 VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS

- ✓ **Espécie da madeira** – foram investigadas duas espécies de madeira diferentes: *Eucalyptus saligna* e *Araucaria angustifolia*;
- ✓ **Tipo de entalhe** – os entalhes analisados foram do tipo reto e misulado, com as dimensões recomendadas pela NBR 7190/97;
- ✓ **Solicitações** – os entalhes foram avaliados em duas situações diferentes: solicitados apenas ao cisalhamento e a flexão e cisalhamento.

3.2 CONFECÇÃO DOS ENTALHES

Foram confeccionadas doze vigas com 2 metros de comprimento e seção transversal de 5x10cm (Figura 22), seis de cada espécie de madeira. Sendo assim, metade das vigas de cada espécie possuía entalhe do tipo reto e a outra metade, misulado.

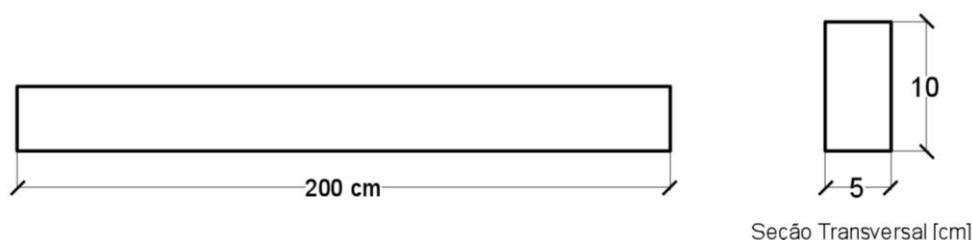


Figura 22 - Dimensões das vigas para o ensaio

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 7,5cm.

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 (Figura 21). O valor obtido para a altura do entalhe misulado (h_1) foi de 5cm.

Depois de calculados, os entalhes foram executados a 10cm da extremidade do vão da viga de modo a permitir o encaixe da estrutura nos apoios para o ensaio a flexão (Figura 23).

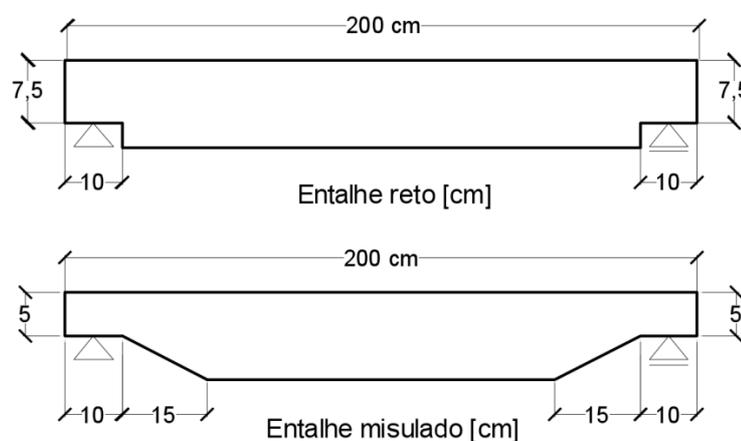


Figura 23 - Detalhe do posicionamento do apoio no ensaio a flexão

Os entalhes foram executados com o auxílio de uma serra de esquadria de alta precisão (Figura 24a), e o para acabamento final dos cortes foi utilizado um formão (Figura 24b). O resultado final dos entalhes é apresentado na Figura 25.

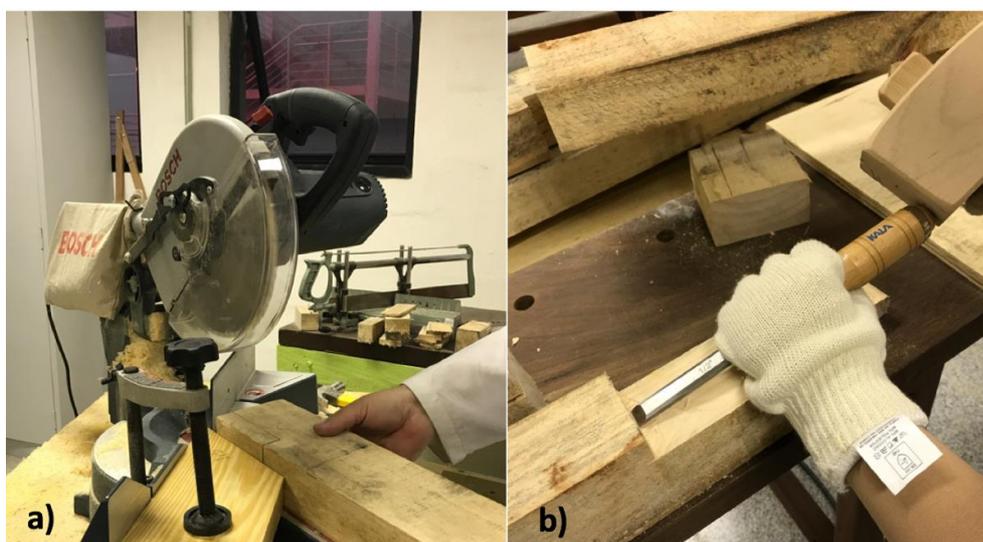


Figura 24 - Equipamentos utilizados para a confecção dos entalhes: a) serra; b) formão.



Figura 25 - Vigas com entalhes finalizados

3.3 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.

3.3.1 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 (Figura 26), conforme a NBR 7190/97.

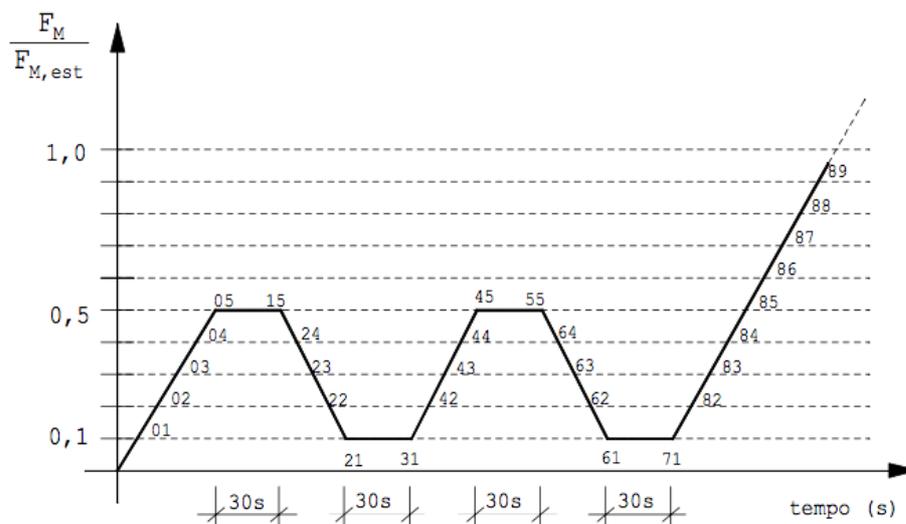


Figura 26 - Diagrama de carregamento para ensaio de flexão
Fonte: NBR 7190/1997

As vigas foram posicionadas de modo que a força fosse aplicada no meio do vão, bem como os entalhes ficassem o mais próximo possível dos apoios, como mostram as Figuras 27 e 28.

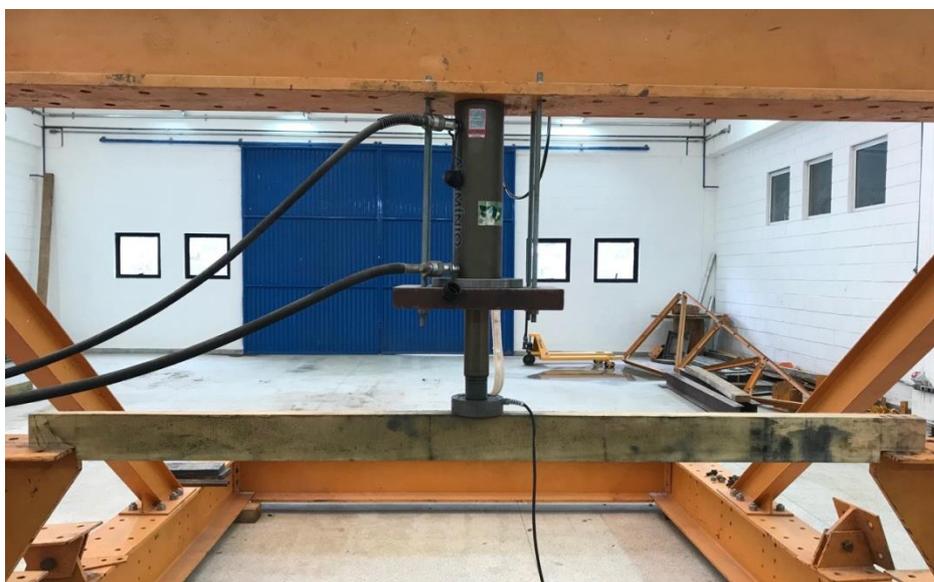


Figura 27 - Posicionamento da viga para ensaio de resistência à flexão simples



Figura 28 - Detalhe no apoio do entalhe para ensaio de flexão simples

3.3.2 Ensaio de Resistência ao Cisalhamento

Após os ensaios de flexão, as quatro vigas tiveram seus apoios removidos a uma distância de 10cm 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 (Figura 13). Como os entalhes foram realizados em vigas, as fibras ficaram na horizontal, o oposto do corpo de prova padrão da NBR 7190/97. Na Figura 29 são apresentados os corpos de prova confeccionados para ensaio.

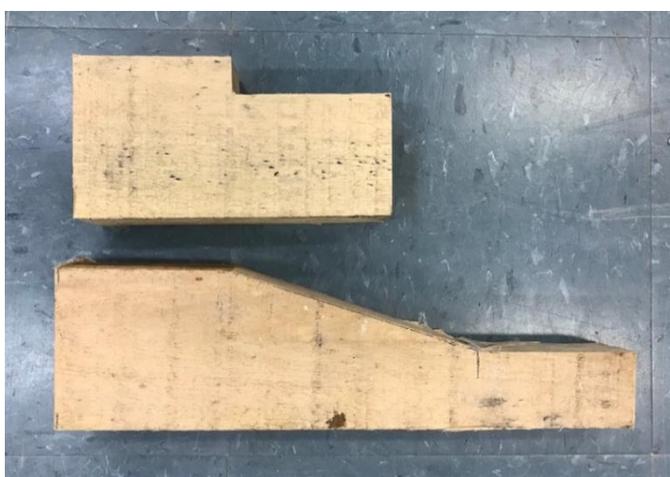


Figura 29 - Corpos de prova para ensaio de cisalhamento

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 30.

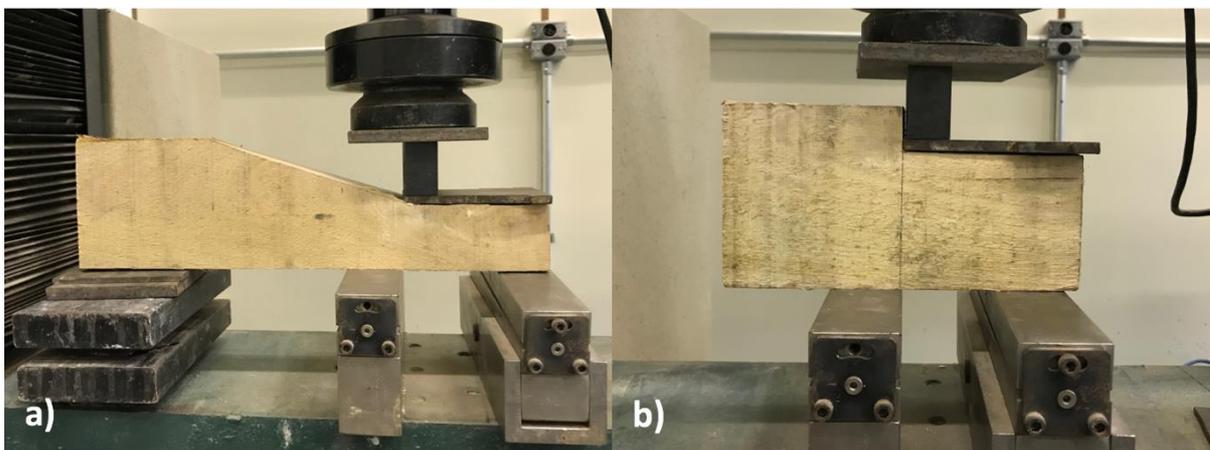


Figura 30 - Posicionamento das peças para o ensaio de cisalhamento: a) entalhe misulado; b) entalhe reto.

As áreas de cisalhamento foram calculadas conforme indicado na Figura 31.

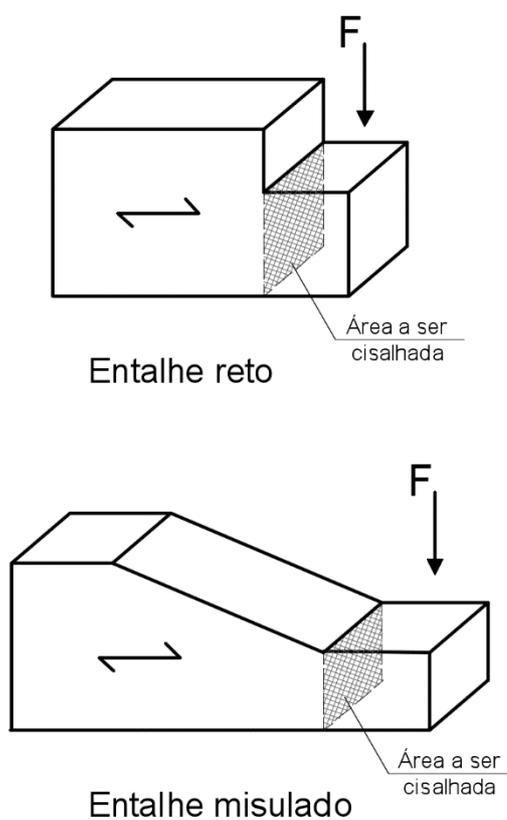


Figura 31 - Representação das áreas de cisalhamento dos corpos de prova

Após a realização dos ensaios, foram calculadas as resistências médias de cada espécie e cada tipo de entalhe por meio da Equação 3, apresentada a seguir.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^k X_i \cdot n_i}{\sum_{i=1}^k n_i} \quad (3)$$

Como não foi feita caracterização das peças para simular uma situação real de utilização, os valores de umidade foram estimados a partir da Equação 4.

$$f_{12} = f_{U\%} \left[1 + \frac{3 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (4)$$

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

Neste capítulo 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	Resistência Máxima	Flecha
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 32 a 39 são apresentadas as séries temporais de forças dos ensaios de flexão simples das quatro vigas seguidas de fotos do momento de ruptura de cada uma.

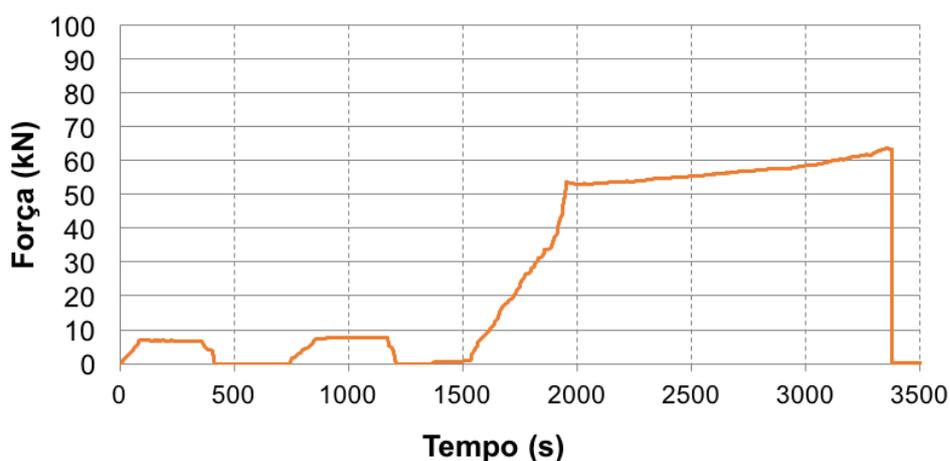


Figura 32 - Séries Temporais de Forças - Ensaio de Flexão Simples - Viga AM03



Figura 33 - Ruptura da viga AM03

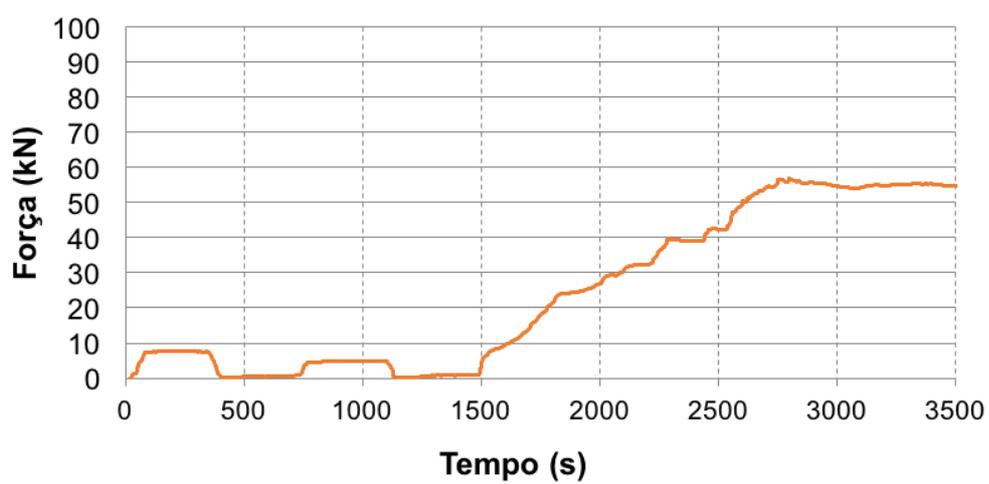


Figura 34 - Séries Temporais de Forças - Ensaio de Flexão Simples - Viga AR01



Figura 35 - Ruptura da viga AR01

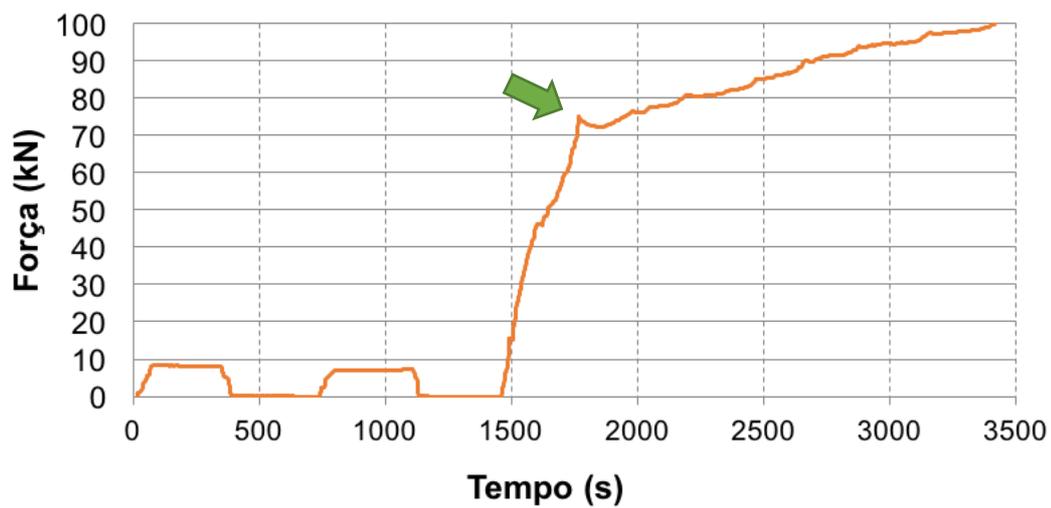


Figura 36 - Séries Temporais de Forças - Ensaio de Flexão Simples - Viga EM01



Figura 37 - Ruptura da viga EM01

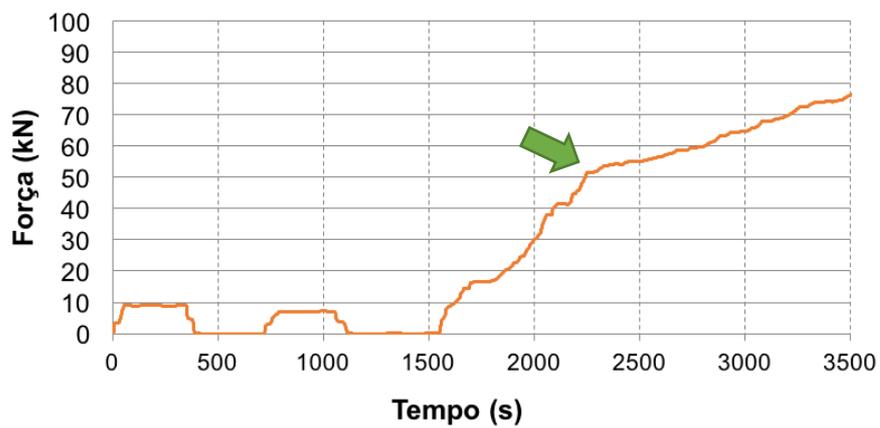


Figura 38 - Séries Temporais de Forças - Ensaio de Flexão Simples - Viga ER01



Figura 39 - Ruptura da viga ER01

Como é possível observar nas Figuras 33, 35, 37 e 39, houve aleatoriedade nos modos de ruptura. No caso das vigas de Araucária, teve-se ruptura frágil por fendilhamento, na viga AM03 (Figura 33), enquanto a viga AR01 rompeu devido à presença de um nó na parte inferior, o que provocou o fissuramento do material (Figura 35), 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 37 e 39).

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 36), e 50 kN, para o entalhe reto (Figura 37). 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.

4.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Os resultados obtidos a partir do ensaio de resistência ao cisalhamento são apresentados na Figura 40. Os dados completos são apresentados no Apêndice A.

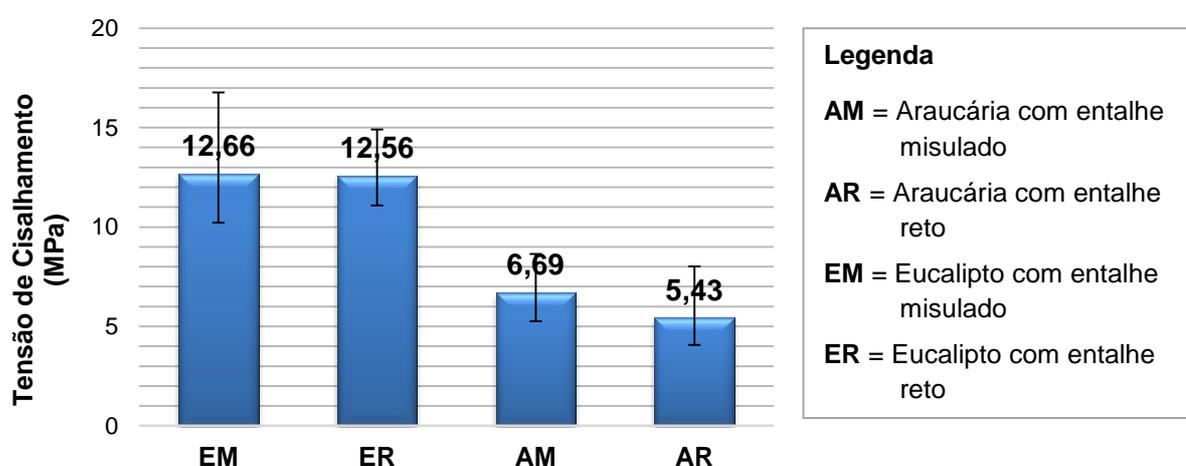


Figura 40 - Resultados de resistência ao cisalhamento

Assim como nos ensaios de flexão simples, observou-se uma maior resistência nas peças de Eucalipto se comparadas às de Araucária. Já no caso dos entalhes, os do tipo misulado suportam maiores tensões cisalhantes do que os do tipo reto, como mostra a Figura 41.

Nas Figuras 41 a 48 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.

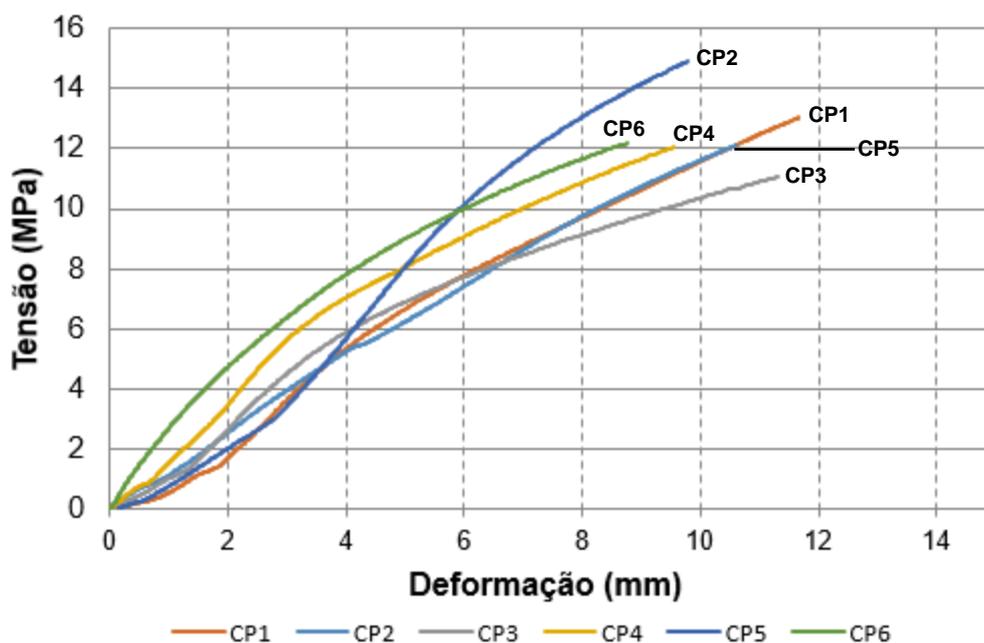


Figura 41 - Diagrama de tensões normais dos ensaios de cisalhamento - Eucalipto com entalhe reto (ER)

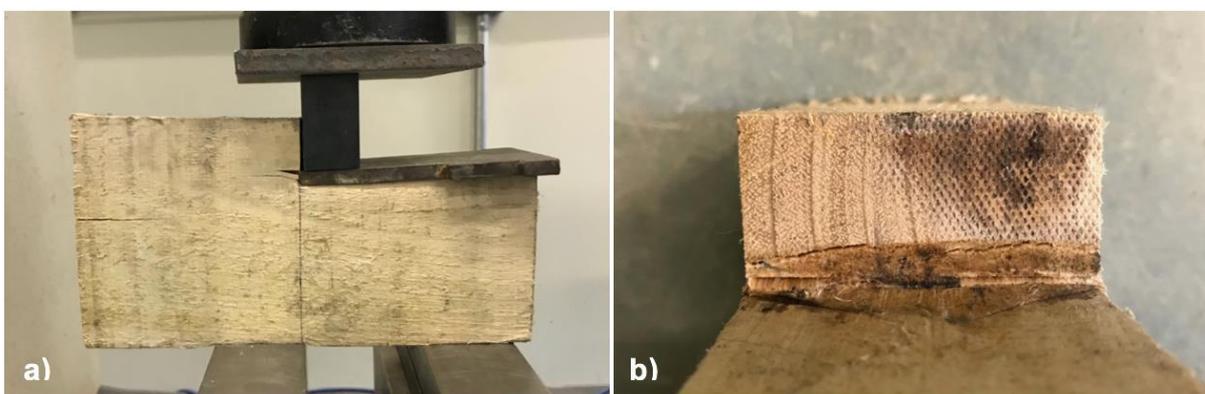


Figura 42 – Amostra 3: a) momento da ruptura; b) fissuras no entalhe

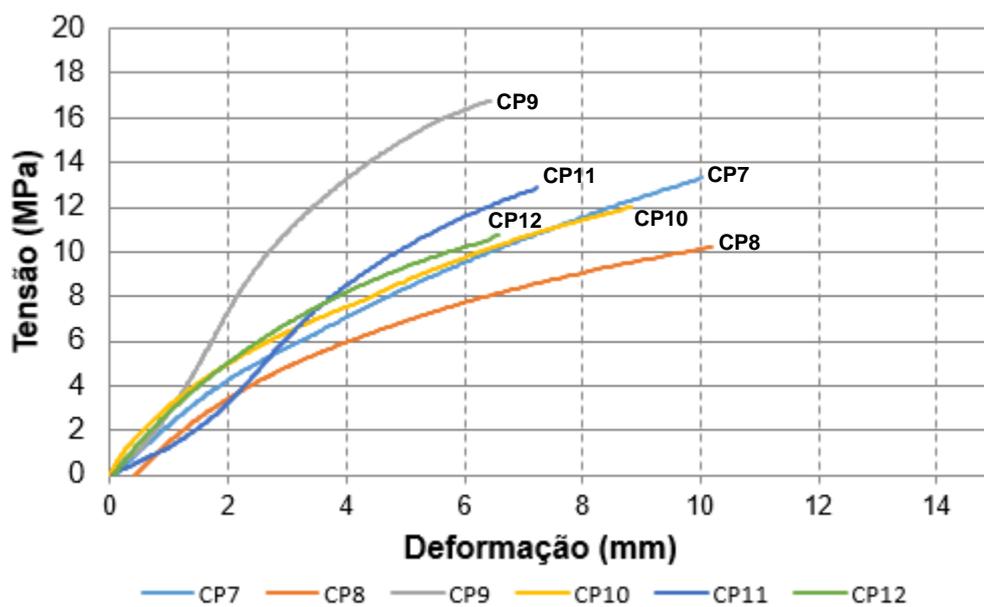


Figura 43 - Diagrama de tensões normais dos ensaios de cisalhamento - Eucalipto com entalhe misulado (EM)



Figura 44 – Amostra 7: a) momento da ruptura; b) fissuras no entalhe

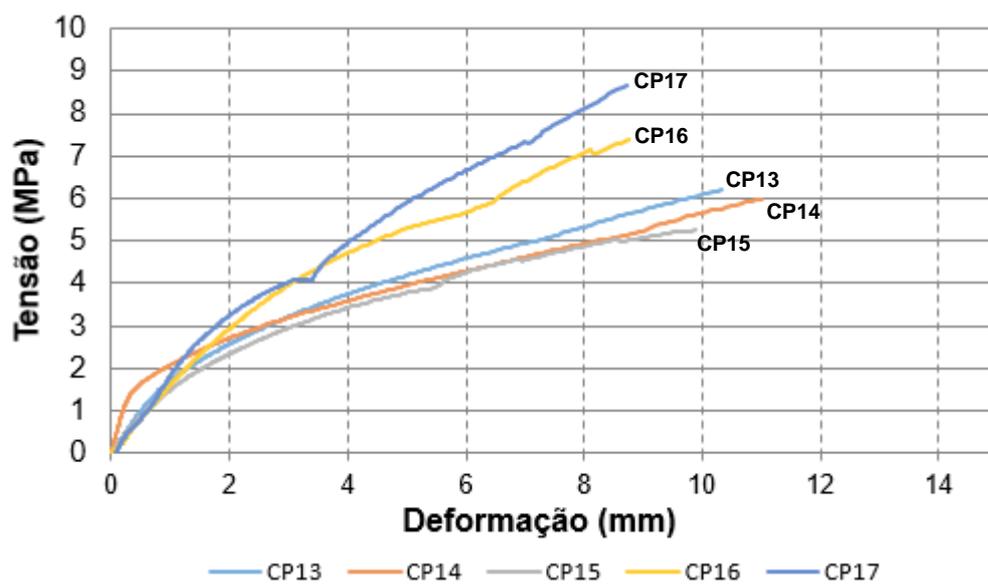


Figura 45 - Diagrama de tensões normais dos ensaios de cisalhamento - Araucária com entalhe misulado (AM)

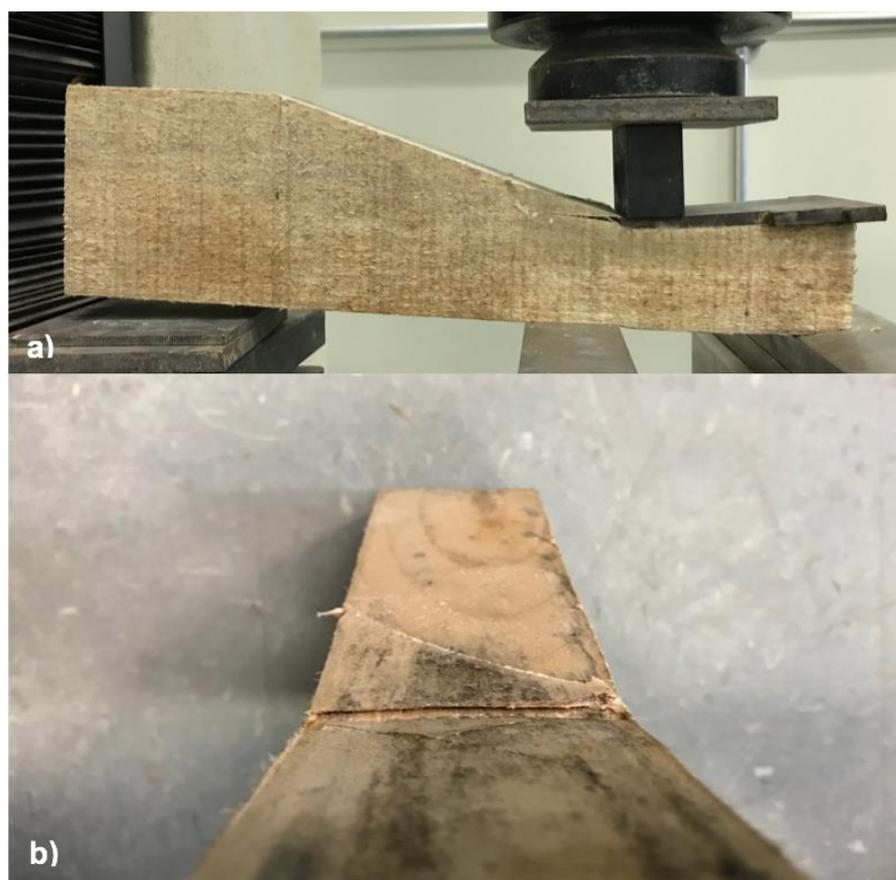


Figura 46 – Amostra 14: a) momento da ruptura; b) fissuras no entalhe

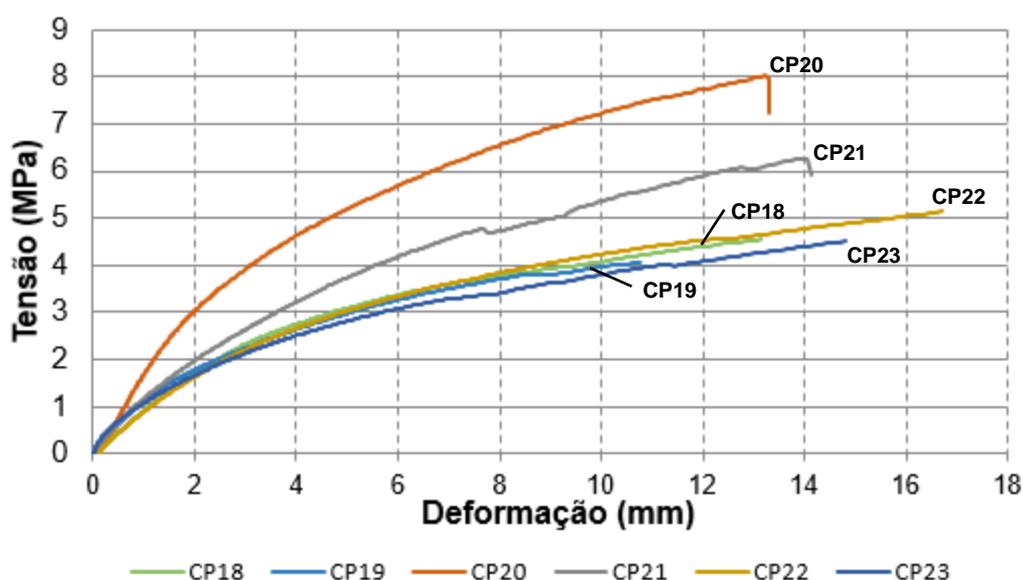


Figura 47 - Diagrama de tensões normais dos ensaios de cisalhamento - Araucária com entalhe reto (AR)

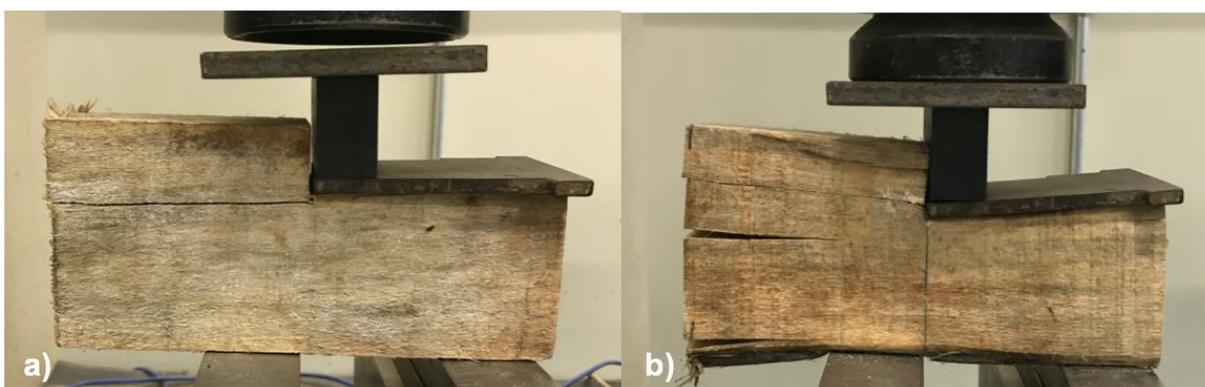


Figura 48 - Momento da ruptura: a) Amostra 20; b) Amostra 21

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 42, 44, 46 e 48). 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, como ilustrado na Figura 49.

Nas fotos (Figuras 42, 44, 46 e 48) 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 (amostras 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 CP¹	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 4, 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 CP¹	f_{U%} (MPa)²	f₁₂ (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 ($F_{12\%}$) 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 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio dos ensaios realizados procurou-se avaliar a eventual perda de resistência ao cisalhamento na região dos entalhes devido às diferentes solicitações, além de verificar os critérios de dimensionamento propostos pela NBR 7190/97.

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 indica 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 mais fraca. Ou seja, a força aplicada na vertical foi transmitida para a horizontal, causando o fendilhamento e fissuramento 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 mais fraca, ou seja, paralela às fibras.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. A. L. de. **A madeira como material estrutural – Projeto da estrutura da cobertura de um edifício**. Dissertação (Mestrado) – Especialização em Materiais e Processos de Construção, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2012.

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

BENOIT, Y. LEGRAND, B. TASTET, V. **Guide d'application Eurocode 5 – Calcul des structures en bois**. Paris: Eyrolles, 2008.

CALIL JUNIOR, C. **Manual de projeto e construção de pontes de madeira**. São Carlos: Suprema, 2006

CALIL JUNIOR, C.; BRITO, L. D. **Manual de projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento**. São Carlos, 2010.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. 1ª Edição, Barueri: Manole, 2003.

CARDÃO, C. **Técnica da construção**. Coleções Engenharia e Arquitetura, 2. v. 2ª Edição, Belo Horizonte: 1969.

CORDOVIL, F. A. B.; RIZZO, I. M. L. **Vigas entalhadas**. In: VIII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, julho de 2002, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia, 2002.

CRUBILÉ, P. **Charpentés en bois – Conception**. Dossier: Techniques de L'ingénieur - École Supérieure du Bois, 2012.

DOS SANTOS, J. A. **Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira**. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Minho. Guimarães, 2007.

FIGUEIREDO, C. A. S.; CARRASCO, E. V. M. **Do artesanal ao industrial: dois momentos da carpintaria no Brasil**. 4º Seminário Ibero-Americano de Arquitetura e Documentação, Belo Horizonte, 2015.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook – Wood as an engineering material**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 508 p., 5-2, 2010.

GESUALDO, F. A. R.; SOUZA JR, D. A. **Entalhes em seções transversais de vigas de madeira por meio de abordagem numérica**. In: XI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, julho de 2008, Londrina. **Anais...** Londrina, 2008.

GONZAGA, L. A. **Madeira: uso e conservação**. Cadernos Técnicos do Programa Monumenta. Brasília: Programa Monumenta, 2005.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7ª Edição, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Madeira: Uso sustentável na construção civil**. Vários autores, 2. ed., São Paulo: IPT, 2009

JOCKWER, R. **Structural behavior of glued laminated timber beams with unreinforced and reinforced notches**. ETH Zurich. Zurique, 2014.

JOCKWER, R.; STEIGER, R.; FRANGI, A. **State-of-the-art review on approaches for the design of timber beams with notches**. ETH Zurich. Zurique, 2014.

KATINSKY, J. R. O ofício da carpintaria no Brasil: justificação para uma investigação sistemática. **Revista de História**. São Paulo, v. 34, n. 70, p. 521-535, 1967.

KUKLÍK, P. **History of timber structures**. In: HANDBOOK 1 – TIMBER STRUCTURES, 1-14, Leonardo da Vinci Pilot Projects. Praga (República Checa), 2008.

LANG, E. M. **An alternative method for shear strength assessment**. Forest Products Journal. Madison, Wis., v. 47, n. 11/12, 1997.

MADEGRANDE MADEIRAS. **Madeiras para construção**. Disponível em: <<http://madegrandemadeiras.com.br/home/portfolio-item/madeiras-para-construcao-5/>>. Acesso em: 19 mai. 2017.

MARQUES, L. E. M. M. **O papel da madeira na sustentabilidade da construção.** Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2008.

MEDEIROS, R.C. **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, 2010.

NORDICASA. Disponível em: <<http://www.nordicasa.eu/pt-pt/.24-03-2012>> Acesso em: 19 mai. 2017.

PEREIRA, R. B. A. C. S. S. R.; CHAHUD, E. **Sambladuras em telhados com estrutura de madeira tipo howe em belo horizonte.** Revista Madeira Arquitetura & Engenharia, n. 21, ano 8, 2007.

PIMENTA, M. C. A.; PIMENTA, L. F., BIELSCHOWSKY, B. B.; SERRAGLIO, J. P. **Mestres Artífices – Santa Catarina.** Brasília: Iphan, 2012.

PFEIL, W; PFEIL, M. **Estruturas de madeira.** 6ª Edição, Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PORTEOUS, J.; KERMANI, A. **Structural Timber Design to Eurocode 5.** Oxford: Blackwell Science, 2007.

reTHINK WOOD. **Connection Solutions for Modern Wood Buildings.** Engineering News-Record, October 20/27, 2014.

RITTER, M. A. **Timber Bridges: Design, Construction, Inspection and Maintenance.** Manual, 1ª Edição. Washington, Forest Service, 1990.

SANTOS NETO, A. B. S. **Cisalhamento em corpos-de-prova de madeira.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

SOUSA, C. M. **Evolução da carpintaria na arquitetura.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto, Porto, 2014.

TROUY-TRIBOULOT, M. C.; TRIBOULOT, P. **Matériau bois: Structure et caractéristiques.** Dossier: Techniques de L'ingénieur - École Supérieure du Bois, Paris, 2012.

VERMONT TIMBER WORKS. Disponível em: <<http://www.vermonttimberworks.com/wp-content/uploads/2016/11/barn-home-sandwich-nh-20.jpg>>. Acesso em: 19 mai. 2017.

VIEIRA, M. C. S. **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, 2016.

VIEIRA, M. C. S; GESUALDO, F. A. R. **Efeitos produzidos por entalhes nos terços extremos do vão de vigas estruturais de madeira.** Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal), v. 25, n. 1, 2016.

VILELA, M. I. M. **A madeira na construção de habitação coletiva.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Comunicação, Artes, Arquitetura e Tecnologias da Informação, Universidade Lusófona do Porto, Porto, 2013.

ZUCCARATTO. **Reserva Natural Vale: um paraíso de Mata Atlântica, aves e animais à sua espera.** Disponível em: <<http://www.zuccaratto.jor.br/blogs/turismo-e-cia/reserva-natural-vale-um-paraiso-de-mata-atlantica-aves-e-animais-a-sua-espera/>>. Acesso em: 14 out. 2017.

APÊNDICE A

Tabela A1 - Resistência ao cisalhamento dos corpos de prova de Eucalipto com entalhe reto

CP	Viga	Apoio	Força (kN)	Área (cm ²)	Tensão (MPa)	Observações
1	ER1	A	53,78	41,25	13,04	Ensaio de Flexão
2	ER1	B	50,89	42,00	12,11	Ensaio de Flexão
3	ER2	A	44,39	40,04	11,08	
4	ER2	B	51,00	42,35	12,04	
5	ER3	A	65,12	43,68	14,91	
6	ER3	B	58,19	42,35	12,18	
Média			53,90	41,95	12,56	

Tabela A2 - Resistência ao cisalhamento dos corpos de prova de Eucalipto com entalhe misulado

CP	Viga	Apoio	Força (kN)	Área (cm ²)	Tensão (MPa)	Observações
7	EM1	A	33,94	25,50	13,31	Ensaio de Flexão
8	EM1	B	28,14	27,50	10,22	Ensaio de Flexão
9	EM2	A	48,63	29,00	16,77	
10	EM2	B	34,14	25,50	12,01	
11	EM3	A	34,53	26,00	12,88	
12	EM3	B	36,21	25,50	10,78	
Média			35,93	26,50	12,66	

Tabela A3 - Resistência ao cisalhamento dos corpos de prova de Araucária com entalhe misulado

CP	Viga	Apoio	Força (kN)	Área (cm ²)	Tensão (MPa)	Observações
13	AM1	A	20,29	27,50	6,20	
14	AM1	B	20,77	27,50	5,98	
15	AM2	A	15,31	24,00	5,26	
16	AM2	B	16,76	21,00	7,37	
17	AM3	A	18,15	21,00	8,64	Ensaio de Flexão
18	AM3	B	x	x	x	Ensaio de Flexão - descartado
Média			18,26	24,20	6,69	

Tabela A4 - Resistência ao cisalhamento dos corpos de prova de Araucária com entalhe tipo reto

CP	Viga	Apoio	Força (kN)	Área (cm ²)	Tensão (MPa)	Observações
19	AR1	A	19,02	38,34	4,56	
20	AR1	B	18,26	37,44	4,06	
21	AR2	A	29,21	35,28	8,02	
22	AR2	B	28,97	33,84	6,27	
23	AR3	A	26,06	39,05	5,14	
24	AR3	B	21,61	36,92	4,52	
Média			23,85	36,81	5,43	