

Avaliação da resistência à tração perpendicular às fibras da madeira nas direções radial e tangencial

Nilson Tadeu Mascia ^[1], David E. Kretschmann ^[2], Aléxia Brandão Ribeiro ^[3]

[1] ntm@unicamp.br. Universidade Estadual de Campinas/Departamento de Estruturas da FEC, Brasil. [2] dkretschmann@gmail.com. American Lumber Standard Committee, Estados Unidos. [3] a.brandao.ribeiro@gmail.com. Universidade de Coimbra/Departamento Engenharia Civil, Portugal.

RESUMO

A discussão sobre a importância do conhecimento da resistência à tração perpendicular às fibras para uma melhor compreensão do comportamento mecânico da madeira em diversas situações, tais como na análise de retração, na análise de falhas de peças de madeira laminadas coladas ou na formulação de critérios de resistência para materiais anisotrópicos aplicados à madeira, torna evidente que a investigação dos valores dessas resistências é necessária. Neste trabalho foi avaliada a resistência à tração perpendicular às fibras para as direções radial e tangencial, considerando-se uma amostra de 83 corpos de prova da espécie de madeira *Acer saccharinum*, comumente conhecida como *Sugar Maple*. A metodologia usada para o ensaio de tração seguiu a norma americana ASTM D143. Além disso, foi analisada a influência da densidade nos valores de resistência para cada direção. Os modos de ruptura verificados nos corpos de prova nas direções pesquisadas são acompanhados por uma simulação numérica via software Ansys. A partir da análise estatística realizada, pode-se concluir que os resultados experimentais de resistências à tração perpendicular às fibras nas direções radial e tangencial apresentam uma diferença estatística significativa. Observou-se também que a densidade não teve influência estatisticamente relevante nos valores de resistência nas duas direções avaliadas.

Palavras-chave: Tração perpendicular. Resistência. Direção radial. Direção tangencial. Densidade.

ABSTRACT

*The discussion on the importance of knowing the tension perpendicular to grain strength for a better understanding of the mechanical behavior of wood in various situations, such as shrinkage analysis, failure analysis of glued laminated pieces or failure criterion formulation of anisotropic materials applied to wood, becomes evident the investigation of the values of this strength is required. This work evaluated the tensile perpendicular to grain strength for the radial and tangential directions, considering a sample of 83 specimens of *Acer saccharinum* wood species, or commonly known as *Sugar Maple*. The methodology used for the tests was in accordance with ASTM D143. In addition, the influence of density on the strength values for each direction was verified. The failure modes found on the specimens in the radial and tangential directions are accompanied by a numerical simulation using Ansys software. From the statistical analysis performed, it can be concluded that the experimental results of tension strengths perpendicular to grain in the radial and tangential directions present a significant statistical difference. Moreover, the density had no statistically significant influence on the strength values in both radial and tangential directions.*

Keywords: *Tension perpendicular to grain. Strength. Radial direction. Tangential direction. Density.*

1 Introdução

O conhecimento das resistências à tração perpendicular às fibras é importante para uma melhor compreensão do comportamento mecânico da madeira em diversas situações. Pode-se citar, entre as quais, a análise de retração, a análise de falhas de peças de madeira laminadas coladas ou ainda a formulação de critérios de resistência de materiais anisotrópicos aplicados à madeira.

Estudos como o de Kretschmann *et al.* (2010), sobre a influência da resistência à tração perpendicular às fibras desenvolvidos no Forest Products Laboratory (FPL), Madison, Estados Unidos, para o órgão Safety and Health Advisory Committee, com o objetivo de investigar as rupturas em tacos de baseball ocorridas com frequência em jogos da Major League Baseball (MLB), visaram buscar subsídios científicos com vistas a reduzir a frequência de falhas e propor projetos de pesquisa futuros para continuar a análise do problema. Esse estudo focou na avaliação mecânica da madeira de Sugar Maple que é um material importante para uso em tacos de beisebol pois representa mais de 78% de todos os tacos usados em jogos da MLB. Constatou-se nessas pesquisas a necessidade de um melhor conhecimento da resistência à tração perpendicular às fibras em relação a diferentes eixos de ortotropia da madeira para o entendimento dos fenômenos de falhas verificadas.

Nesse mesmo sentido, pesquisas desenvolvidas no FPL, Madison, EUA, por Mascia (2015) e Fortin-Smith *et al.* (2018), entre outras, nas quais foram investigadas a resistência à tração perpendicular às fibras, serviram de tema para este trabalho.

Utilizando-se de amostra com 83 corpos de prova e considerando-se amostras da espécie de madeira *Acer saccharinum*, ou simplesmente Sugar Maple foi avaliada a resistência à tração perpendicular às fibras nas direções de ortotropia da madeira, radial e tangencial, com o emprego da norma americana ASTM D143 (ASTM, 2014) para o desenvolvimento experimental deste trabalho.

Verificou-se também a influência da densidade nos valores de resistência para cada direção, visto que esse parâmetro físico é associado à resistência da madeira.

Analisou-se os modos de ruptura que ocorreram nos corpos de prova ensaiados nas direções radial e tangencial e uma simulação numérica, através do software Ansys (SAS, 2009), foi elaborada para se comparar as regiões críticas que iniciaram os processos de rupturas.

Com base em uma análise estatística de resultados experimentais, pode-se concluir que os valores de resistências à tração perpendiculares às fibras nas direções radial e tangencial apresentam uma diferença estatística significativa. Por outro lado, a densidade não teve influência estatisticamente relevante nos valores de resistência nas direções, radial e tangencial.

2 Referencial teórico

A resistência à tração perpendicular é fator de importância na compreensão do comportamento mecânico da madeira em várias situações, como análise de retração, análise de rupturas de vigas laminadas coladas e outras.

Assim, a análise de contração da madeira, por exemplo, em um processo de secagem, pode ser analisada do ponto de vista da influência das tensões nas direções radial e tangencial da madeira e das forças nessas direções. Certos tipos de rupturas ocorrem quando tensões são geradas pela secagem, podendo atingir níveis superiores à resistência à tração perpendicular das fibras (WOOD HANDBOOK, 2010).

Já para avaliar o projeto ou verificar os elementos estruturais da madeira, são utilizados os critérios de resistência, de acordo com Fusco (1993), Mascia e Simoni (2013), entre outros. A base teórica dos critérios de resistência envolve o conhecimento da resistência à tração perpendicular às fibras, sendo considerados, para a madeira, as direções ortotrópicas (NICOLAS, 2006). O EUROCODE 5 (CEN, 2004) apresenta uma expressão que combina tensões de tração perpendicular às fibras e de cisalhamento para verificar ou dimensionar as peças de madeira laminada colada.

Estudos sobre a resistência à tração perpendicular às fibras realizados por Kretschmann (2008) e Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020) ilustraram que a tração perpendicular às fibras é muito sensível à orientação das fibras, radial ou tangencial, ou mesmo para outras direções.

Em estruturas ou elementos estruturais existem vários exemplos interessantes relacionados ao conhecimento da resistência à tração perpendicular às fibras. Por exemplo, Franke, Franke e Harte (2015) destacaram que quando a capacidade à tração da madeira é excedida, em especial devido à baixa resistência à tração perpendicular a das fibras, ocorrem rupturas frágeis, como pode ser observado nas vigas de madeira. Já Helandersson e Larsen (2003) descrevem a importância do conhecimento da tração

perpendicular às fibras em vários elementos, como vigas laminadas coladas, retas ou curvas, na vizinhança de uma junta, com peças de seção reduzida perto de suportes, múltiplos entalhes, peças tracionadas com entalhes e em outras situações.

Nesse contexto, esta pesquisa é direcionada para avaliar experimentalmente a resistência à tração perpendicular às fibras utilizando-se a metodologia da norma americana, ASTM D143 (ASTM, 2014), nas direções radial e tangencial. Para o cálculo do valor dessa resistência (f_{tp}) utiliza-se a expressão:

$$f_{tp} = \frac{F_{rup}}{A} \quad (1)$$

considerando-se a força de ruptura (F_{rup}) dividida pela área da seção transversal (A). Observa-se que tal expressão é uma forma aproximada pois a distribuição de tensões na região central do corpo de prova normalizado não é uniforme, conforme Bodig e Jayne (1982) entre outros, e verificada na análise numérica deste trabalho.

Além disso, neste trabalho é analisada a influência da densidade, são mostrados os modos de rupturas de amostras radiais em tais direções e, também, é apresentada uma simulação numérica para verificar a tendência das rupturas.

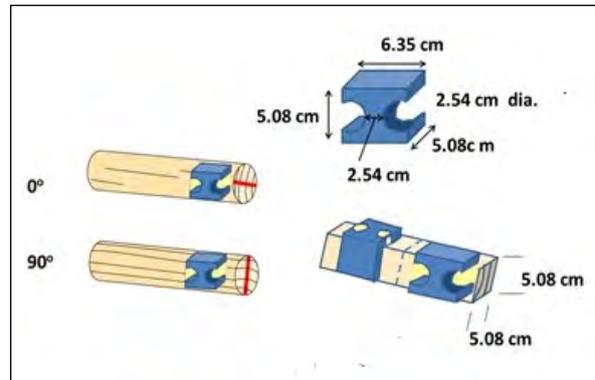
3 Método da pesquisa

As amostras de *Sugar Maple* (*Acer saccharum*) foram coletadas de duas fontes, Leatherstockings em Nova York, fonte principal de coleta, e Louisville Slugger em Louisville Kentucky, fonte secundária de coleta, nos Estados Unidos. Destaca-se que as amostras da fonte secundária apresentavam, a priori, densidades maiores que a da fonte principal. Um inventário das peças fornecidas pela Leatherstocking e Louisville Slugger foi elaborado para avaliar a distribuição geral das densidades das peças. O material da Leatherstockings foi representado por um grupo L e o da Louisville Slugger representado por um grupo S. A escolha das fontes e o número de amostras advindas de cada uma delas estavam relacionados com pesquisas desenvolvidas no Forest Products Laboratory (FPL), Madison, WI, Estados Unidos, sobre tacos utilizados em beisebol pela Major League Baseball's e Major League Baseball Players Association's SHAC, com o objetivo de se buscar subsídios técnicos para reduzir a frequência de rupturas frágeis verificadas nesses tacos.

As peças com 6,98 cm de diâmetro e 78,74 cm (também com 93,98 cm) de comprimento foram

fornecidas à carpintaria do FPL. De 83 peças foram confeccionadas amostras (corpos de prova) com dimensões de 5,08 cm por 5,08 cm por 6,35 cm, para se avaliar a resistência à tração perpendicular às fibras. O padrão de corte é ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Corpos de prova para ensaio de resistência à tração perpendicular às fibras



Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

A Figura 2 exhibe as peças cilíndricas estocadas e corpos de prova de tração perpendicular confeccionados.

Figura 2 – Corpos de prova para ensaio de resistência à tração perpendicular às fibras



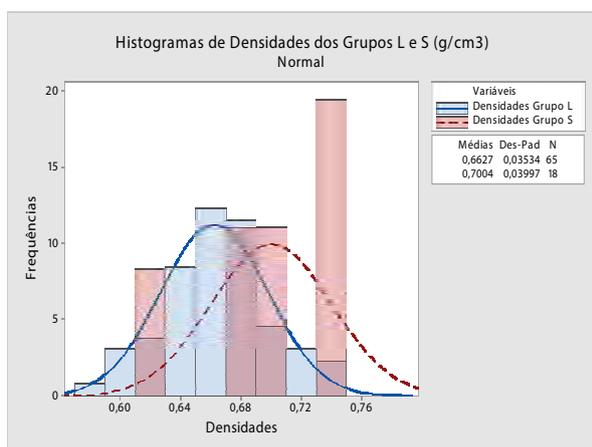
Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

3.1 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova para a avaliação da resistência à tração perpendicular às fibras vieram das regiões laterais das peças ilustradas na Figura 1. A orientação indicada por 0° ou 90° correspondia às orientações radiais ou tangenciais (Figura 3). O teor médio de umidade para as amostras foi de 13%.

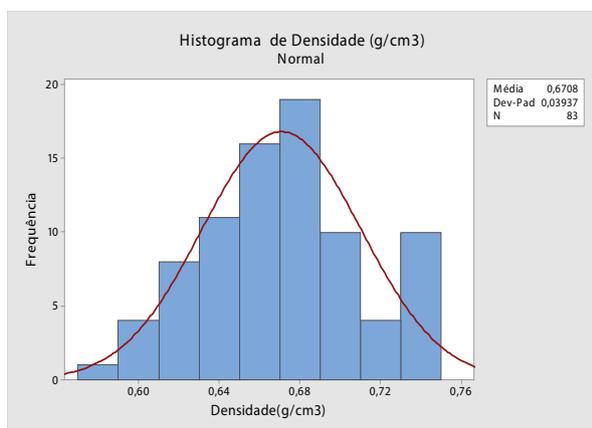
A faixa de densidade das amostras encontrava-se de 0,5749 a 0,7421 g/cm³. Os histogramas que mostram a faixa de densidade para os 65 dados do grupo L e 18 para o grupo S são apresentados na Figura 3, destacando-se a variação entre as densidades de cada grupo L e S. Note-se que a densidade média do grupo S é 5,68% maior que a do grupo L. Na Figura 4 são apresentadas todas as densidades.

Figura 3 – Histogramas de densidades dos grupos L e S



Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Figura 4 – Histograma de densidades das amostras



Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

3.2 Metodologia

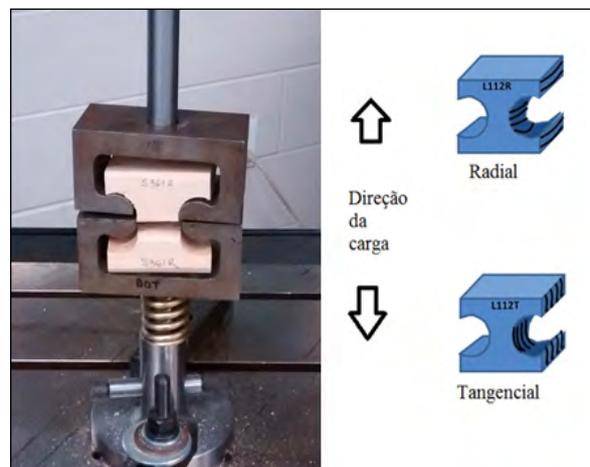
Os corpos de prova para avaliação das resistências à tração perpendicular às fibras foram testados de acordo com a norma ASTM D143 (ASTM, 2014).

Os testes foram conduzidos em corpos de prova conforme identificação indicada na Figura 5.

A carga foi aplicada continuamente durante o ensaio com taxa de movimento da cruzeta móvel de 2,5 mm/min, conforme mostrado na Figura 6. Também estão indicados nessa figura, o corpo de prova e o sistema de aplicação de carga.

Observa-se que o procedimento da norma americana é adotado pela norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997), mas a aplicação da força no corpo de prova segundo a sua direção tangencial às fibras, enquanto na ASTM D143 (ASTM, 2014) não é adotada uma direção preferencial.

Figura 5 – Identificação entre os corpos de prova para ensaio de resistência à tração perpendicular às fibras



Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Figura 6 – (a) Sistema de ensaio e de carregamento; (b) Detalhes do corpo de prova



Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

3.3 Procedimento estatístico

O procedimento estatístico utilizado neste trabalho baseado no software Minitab (RYAN e JOINE, 1994) é dividido em três etapas e fornece análises sobre:

(i) Teste de normalidade para um teste de hipótese de uma amostra, para determinar se a população da qual se extrai a amostra é normal;

(ii) Teste t de duas amostras para teste paramétrico, incluindo intervalos de confiança para a diferença de médias (*Two sample t-test*);

(iii) Análise de regressão para descrever a relação estatística entre o preditor e a variável de resposta, contendo a equação e o gráfico do modelo de regressão, a análise de variância e o Coeficiente de Determinação.

3.3.1 Teste de normalidade

Para se realizar no software Minitab o teste de Normalidade, foi escolhido o valor *p-value* do teste estatístico, que é frequentemente utilizado em testes de hipóteses, onde a hipótese nula, que afirma que a população é normal, é rejeitada ou não. Quanto menor o valor *p-value*, menor é a probabilidade de se aceitar a hipótese nula. Foi adotado valor de *p-value* igual a 0,05 para verificação do teste. Simultaneamente a esse teste, o Minitab oferece quatro opções para determinar se os dados da amostra vêm de uma população normal ou não normal, e o Teste de Normalidade Anderson-Darling foi seguido. Analogamente ao valor *p-value*, os valores menores de Anderson-Darling indicam que a distribuição se ajusta melhor aos dados.

3.3.2 Teste Two-sample t

Conforme mencionado, para determinar se duas populações de *n* elementos têm a mesma média populacional foi executado o teste t de duas amostras do software Minitab. Para esse teste, a suposição de que os dados em cada população seguem uma distribuição normal é necessária para comparar as médias das amostras aleatórias retiradas dessas duas populações.

O teste t de duas amostras verifica se a hipótese nula das duas médias populacionais (μ_1 e μ_2) é igual ou não, ou seja, a hipótese: $H_0: \mu_1 = \mu_2$ versus $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ é testada. Esse teste calcula as seguintes estatísticas para validar a hipótese nula:

i) Se duas amostras pertencem ao mesmo universo usando a seguinte expressão:

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \leq t_{\varphi}(p\%) \quad (2)$$

com: \bar{x}_1 e \bar{x}_2 estimando as medias da primeira e segunda amostras; s_1, s_2 = os respectivos desvios padrão; n_1, n_2 = número de elementos das amostras; $t_{\varphi}(p\%)$ = valor do t' Student' com *p%* de confiança e (*p%*) o nível de confiança adotado.

ii) Se as medias das amostras são estatisticamente equivalentes, i.e., se o intervalo das diferenças entre as médias μ_2 e μ_1 contém o zero determinado por:

$$\begin{aligned} \Delta_- &= (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - t^* \sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}} \leq \mu_2 - \mu_1 \\ &\leq (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) + t^* \sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}} \\ &= \Delta_+ \end{aligned} \quad (3)$$

com t^* o valor correspondente a *p%* de confiança. Tal expressão usa os graus de liberdade (*GL*) de acordo com:

$$GL = \frac{\left[\left(\frac{s_1^2}{n_1} \right) + \left(\frac{s_2^2}{n_2} \right) \right]^2}{\left[\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} \right)^2}{(n_1 - 1)} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2} \right)^2}{(n_2 - 1)} \right]} \quad (4)$$

3.3.3 Análise de regressão

De um modo geral, o modelo de regressão linear pode ser escrito:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (5)$$

no qual é suposto que os erros são normalmente e independentemente distribuídos, média zero e variância σ^2 , ou, simplesmente,, de acordo com Ryan e Joiner (1994).

A análise de regressão pode ser resumida pelos seguintes tópicos:

i) O teste de significância da regressão segue a hipótese:

$$\begin{aligned} H_0: \beta_1 &= 0 \\ H_1: \beta_1 &\neq 0 \end{aligned}$$

Usando-se a seguinte estatística:

$$|t_0| > t_{\frac{\alpha}{2}, n-2} \quad (6)$$

o que implica que a hipótese:

$$H_0: \beta_1 = 0$$

seja rejeitada em um percentual desejável de significância, $t_{\frac{\alpha}{2}, n-k}$ geralmente de 5% a 15%. Assim, é possível aceitar ou não o modelo linear.

Aqui n é o número de pares de dados, α é o ponto percentual de significância, t é a distribuição de Student e $n-k-1$ são os graus de liberdade (GL).

ii) A análise de variância é dada pela seguinte estatística:

$$F_0 = \frac{SS_R/1}{SS_E/(n-2)} = \frac{MS_R}{MS_E} \quad (7)$$

com SS_R a soma dos quadrados da regressão, SS_E as a soma dos quadrados dos erros, MS_R sendo o quadrado médio da regressão e MS_E o quadrado médio residual.

Para testar a hipótese:

$$H_0: \beta_1 = 0$$

é computado o teste estatístico F_0 e é rejeitada H_0 se:

$$F_0 > F_{\alpha, 1, n-2} \quad (8)$$

de acordo com uma determinada probabilidade p .

O Quadro 1 resume o procedimento do teste.

Quadro 1 – Análise de variância para significância da regressão

Fonte	Soma dos Quadrs.	G. L.	Quadrs. médios médio	F_0	p
Regr.	SS_R	k	MS_R		
Resid.	SS_E	$n-k-1$	MS_E		
Total	S_{yy}	$n-1$			

Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

3.3.4 Coeficiente de determinação

A quantidade:

$$R^2 = \frac{SS_R}{S_{yy}} \quad (9)$$

é chamada de coeficiente de determinação e qualifica a proporção de variação do regressor x .

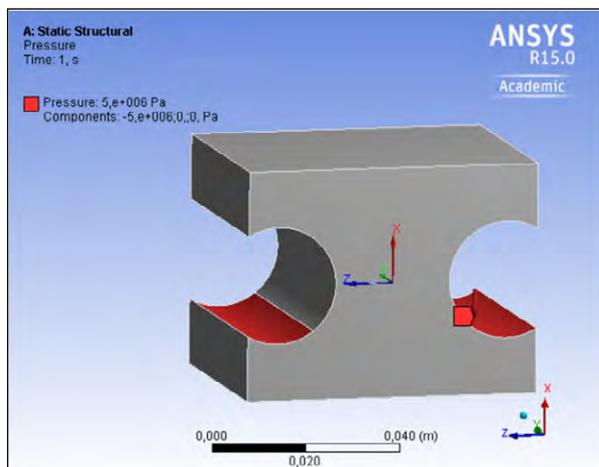
3.4 Análise numérica

Considerando-se as características geométricas do corpo de prova à tração perpendicular e o dispositivo de ensaio, foi realizada a análise numérica via método dos elementos finitos (Ansys, SAS 2009), com base em Ribeiro e Mascia (2019) e Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Para tal desenvolvimento numérico foi utilizada a seguinte discretização do corpo de prova: elemento SOLID186 do Ansys (SAS, 2009) definido por 20 nós com três graus de liberdade por nó, sendo: translações nas direções x , y e z , direções de ortotropia na madeira. O aparelho de aplicação de carga também foi modelado. Para as superfícies de contato foram utilizados outros três elementos, isto é, CONTA174, TARGE170 e SURF154. Para definir a discretização e o número de elementos finitos, foi realizada uma análise de convergência anterior. Finalmente, o tamanho do elemento de 0,5 mm foi adotado, dessa maneira, foi alcançada uma qualidade de cada elemento maior que 0,77. Nas análises numéricas foram necessários 3010 elementos (2276 elementos sólidos e 734 elementos de contato), perfazendo um total de 12645 nós.

Foram analisadas as direções tangencial e radial. Nesse estágio, vale ressaltar que o eixo y está relacionado à profundidade e fixo como a direção longitudinal da fibra de madeira, enquanto o eixo x e o z são as direções radial e tangencial, respectivamente (Figura 7). O valor da carga aplicada na parte superior do aparelho foi de 4,85 kN, o que corresponde a uma tensão normal na região de contato entre o corpo de prova de cerca de 5 MPa.

Figura 7 – Modelo de corpos de prova para análise numérica



Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

As propriedades de elasticidade necessárias para modelagem são apresentadas na Tabela 1, na qual, E_i representa o módulo de elasticidade em cada direção ($i = x, y, z$); G_{ij} é o módulo de elasticidade transversal em cada plano ($ij = xy, yz, xz$) e ν_{ij} é o coeficiente de Poisson em cada plano ($ij = xy, yz, xz$). O módulo elástico longitudinal no eixo y (direção longitudinal) foi fornecido pelos resultados dos testes experimentais de flexão, de acordo com a norma ASTM D143 (ASTM, 2014). As demais propriedades foram determinadas por razões associadas aos módulos elásticos longitudinais para essa espécie de madeira, de acordo com Bodig e Jayne (1982) e Mascia e Lahr (2006).

Tabela 1 – Propriedades elásticas do Sugar Maple em MPa, exceto coeficientes de Poisson

Propriedades elásticas	Valores
E_x	1991,88
E_y	980,85
E_z	15.090,00
G_{xy}	278,22
G_{yz}	950,67
G_{xz}	1.674,99
ν_{xy}	0,774
ν_{xz}	0,065
ν_{yz}	0,037

Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

4 Resultados da pesquisa

4.1 Teste de normalidade

Os testes de normalidade usando o software estatístico Minitab foram realizados para determinar se os dados de uma amostra vêm da população normal. O Quadro 2 lista os resultados do Teste de Normalidade mostrando que todas os valores para as direções radial e tangencial dos grupos de amostras L e S justaram-se à distribuição normal bem como quando se considera o conjunto total dos resultados.

Quadro 2 – Resultados de teste de normalidade

<p><u>1-Resistência a tração-direção radial- Grupo L</u> N=65 resultados. Média 10,28; Desvio padrão 2,41 i) p-value = 0,56 ii) Anderson Darling, AD = 0,30</p>
<p><u>2- Resistência a tração-direção tangencial-Grupo L</u> N=65 resultados. Média 5,19; Desvio padrão 1,64 i) p-value = 0,10 ii) Anderson Darling, AD = 0,63</p>
<p><u>3- Resistência a tração-direção radial- Grupo S</u> N=18 resultados. Média 10,91; Desvio padrão 3,36 i) p-value = 0,33 ii) Anderson Darling, AD = 0,40</p>
<p><u>4- Resistência a tração-direção tangencial-Grupo S</u> N=18 resultados. Média 5,75; Desvio padrão 1,53 i) p-value = 0,62 ii) Anderson Darling, AD = 0,28</p>
<p><u>5- Resistência a tração-direção radial- Grupos L e S</u> N=83 resultados. Média 10,42; Desvio padrão 2,64 i) p-value = 0,57 ii) Anderson Darling, AD = 0,30</p>
<p><u>6- Resistência a tração-direção radial- Grupos L e S</u> N=83 resultados. Média 5,31; Desvio padrão 1,62 i) p-value = 0,18 ii) Anderson Darling, AD = 0,52</p>

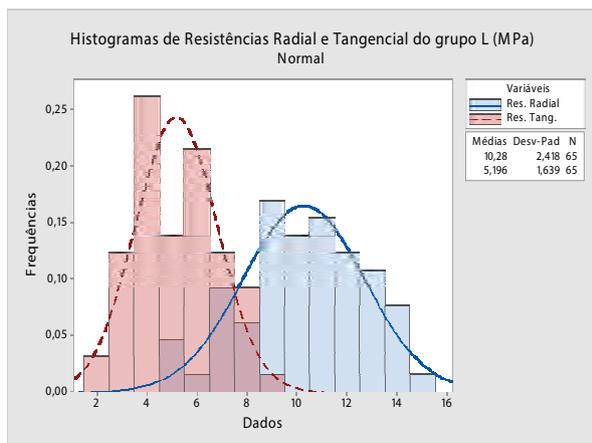
Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

4.2 Resistência à tração perpendicular as fibras

Os resultados obtidos para a resistência à tração perpendicular às fibras das amostras de *Sugar Maple*, para orientações radiais e tangenciais de carga, são apresentados nas Figuras 8 e 9. A amostra total é constituída por corpos de prova de dois locais diferentes, Grupo L e Grupo S. Os resultados foram

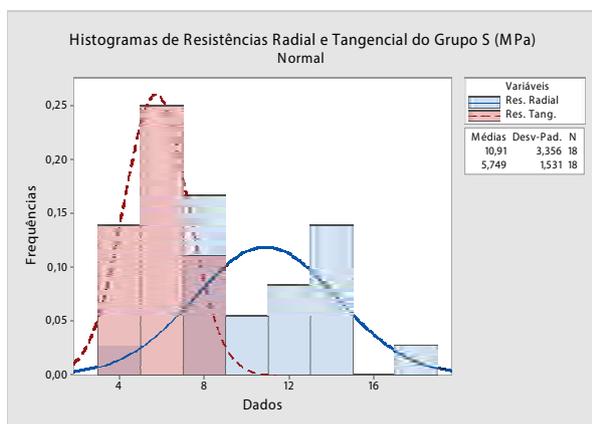
plotados em histogramas de toda a amostra, utilizando-se do programa Minitab (RYAN e JOINER, 1994) para mostrar a tendência de cada grupo. A Figura 8 mostra a resistência à tração nas direções tangencial e radial do Grupo L, enquanto a Figura 9 mostra a resistência à tração tangencial e radial do Grupo S.

Figura 8 – Resistências nas direções radial e tangencial para o grupo L



Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Figure 9 – Resistências nas direções radial e tangencial para o grupo S



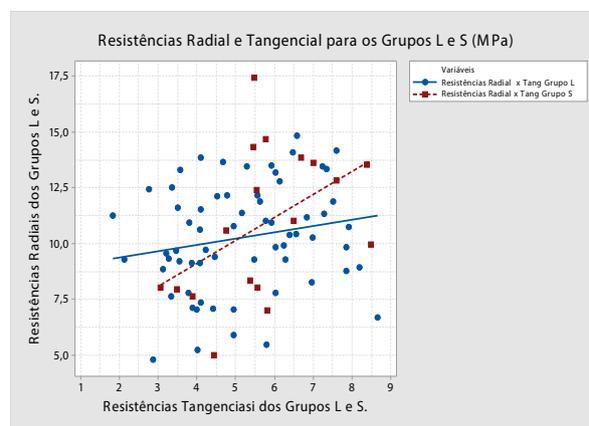
Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Para verificar a relação entre as resistências tangencial e radial é apresentada a Figura 10, na qual se mostra a dispersão dos resultados separados por grupos de amostras, tipo L e S. É possível denotar que ambos têm a mesma tendência e o tipo L, por ter uma

quantidade maior de dados (65 resultados da amostra L em comparação com 18 amostras S), denota uma maior dispersão dos dados ou valores. Assim, a Figura 10 mostra, mesmo que sutilmente, mais claramente as diferenças entre os grupos L e S e a tendência de cada grupo.

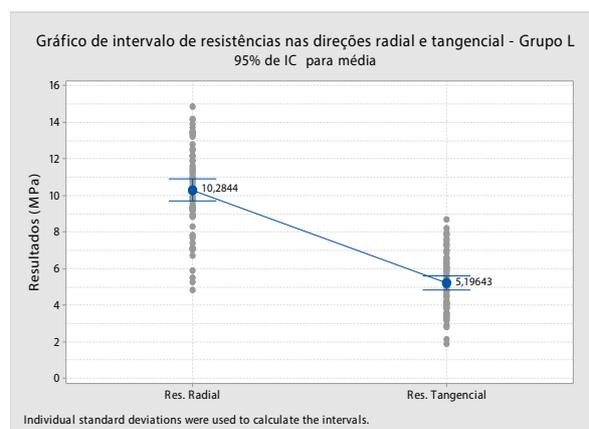
O resumo dos resultados das resistências correspondentes para cada direção de carregamento adotado e para cada grupo é mostrado no diagrama Interval plot da Figura 11 e da Figura 12, para cada grupo, e da Figura 13, para o conjunto dos dois grupos.

Figura 10 – Resultados experimentais dos grupos L e S



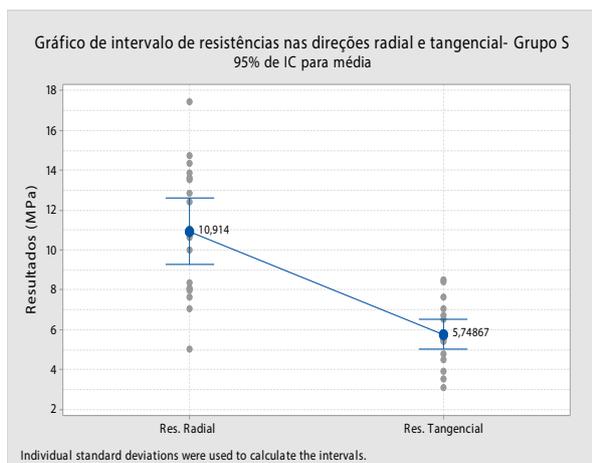
Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Figura 11 – Gráfico de intervalo de resistências nas direções radial e tangencial - Grupo L



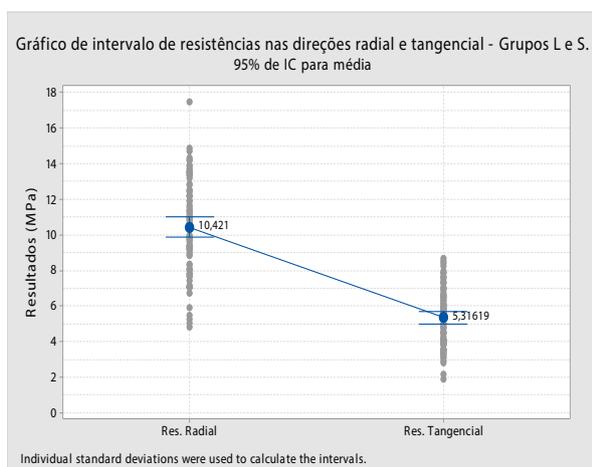
Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Figura 12 – Gráfico de intervalo de resistências nas direções radial e tangencial-Grupo S



Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro.

Figura 13 – Gráfico de intervalo de resistências nas direções radial e tangencial - Grupos L e S



Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

A partir dos dados da Figura 11 a Figura 13, é possível inferir que a resistência à tração perpendicular na direção tangencial é cerca de 51% da direção radial para cada grupo estudado.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese para a comparação entre duas médias via TWOSAMPLE do t-test do Minitab, no qual se estima se a diferença entre as médias das amostras (μ) contém o zero e se as amostras pertencem ao mesmo universo de dados, é possível concluir que as amostras não são estatisticamente equivalentes, como se percebe de forma resumida no Quadro 3, para os valores

de resistência à tensão perpendicular na direção tangencial das amostras L e S e também consideradas em conjunto.

A partir dos resultados do Quadro 3 sobre a análise da diferença entre médias, pode-se inferir que: com 95% de confiança, o intervalo para as médias das resistências não contém o zero; com $t > t_{\phi}(p\%)$ pode-se estimar que não pertencem ao mesmo universo. Em resumo, há evidência de diferença estatística entre os valores de tais resistências.

Quadro 3 – Two-Sample t-Test e Intervalo de Confiança para resistências radial (C1) e tangencial (C2)

<p>Grupo L</p> <p>i) t-Test-média de C1 igual a média de C2 (versus não igual): $t = 14,04$, $p = 0,001$, $GL = 136$ $t_{\phi}(p\%) \approx 1,64$ $\rightarrow t > t_{\phi}(p\%)$</p> <p>ii) Com 95% de IC (Intervalo de Confiança) para média de C1: μ_1, e de C2: μ_2 $\rightarrow (4,37; 5,80)$</p>
<p>Grupo S</p> <p>i) t-Test-média de C1 igual a média de C2 (versus não igual): $t = 5,94$ $p = 0,001$, $GL = 23$ $t_{\phi}(p\%) \approx 1,71$ $\rightarrow t > t_{\phi}(p\%)$</p> <p>ii) Com 95% de IC (Intervalo de Confiança) para média de C1: μ_1, e de C2: μ_2 $\rightarrow (3,37; 6,96)$</p>
<p>Grupos L e S</p> <p>i) t-Test-média de C1 igual a média de C2 (versus não igual): $t = 15,01$ $p = 0,001$, $GL = 136$ $t_{\phi}(p\%) \approx 1,64$ $\rightarrow t > t_{\phi}(p\%)$</p> <p>ii) Com 95% de IC (Intervalo de Confiança) para média de C1: μ_1, e de C2: μ_2 $\rightarrow (4,43; 5,77)$</p>

Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

4.3 Resistência à tração perpendicular às fibras e densidade

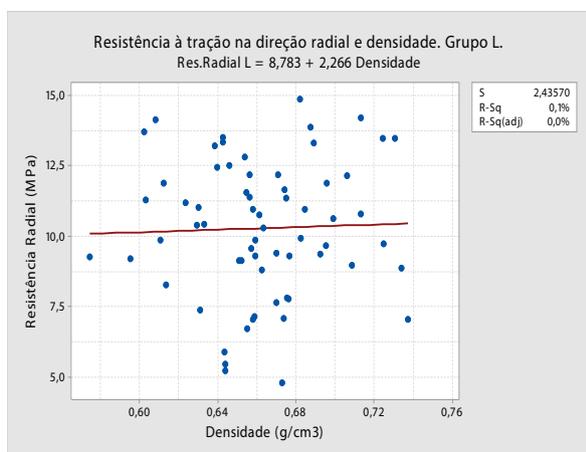
Na análise da relação entre a resistência nas direções radial e tangencial, para os resultados das amostras dos grupos L, S e para os grupos em conjunto, foi realizada análise de regressão. Nota-se que as amostras advindas do grupo S têm maiores densidades que a do grupo L. As tabelas e figuras dessa subseção dão subsídios para tal análise.

Tabela 2 –Análise de variância: Resistência Radial versus densidade- Grupo L

Fonte	GL	SS	MS	F	p
Regressão	1	0,410	0,410	0,07	0,79
Erro	63	373,757	5,932		
Total	64	374,168			
Equação: Res. Radial = 8,78 + 2,27 Densidade					
S	R-sq				
2,43570	0,1%				

Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Figura 14 – Relação entre resistência à tração na direção radial e densidade - Grupo L



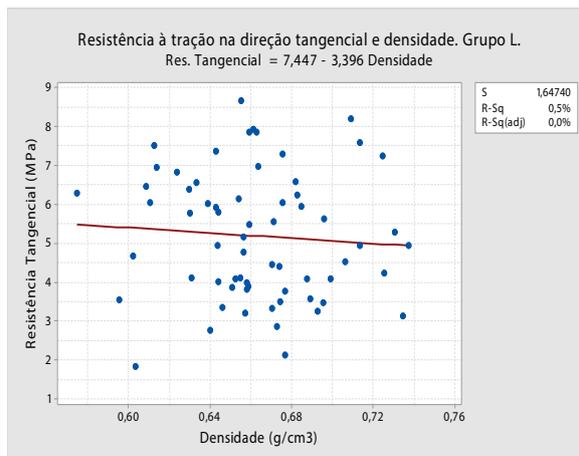
Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Tabela 3 – Análise de variância: Resistência tangencial versus densidade - Grupo L

Fonte	GL	SS	MS	F	p
Regressão	1	0,922	0,921	0,34	0,56
Erro	63	170,978	2,713		
Total	64	171,900			
Equação: Res. Tangencial = 7,45 + 3,40 Densidade					
S	R-sq				
1,64740	0,5%				

Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Figura 15 – Relação entre resistência à tração na direção tangencial e densidade - Grupo L



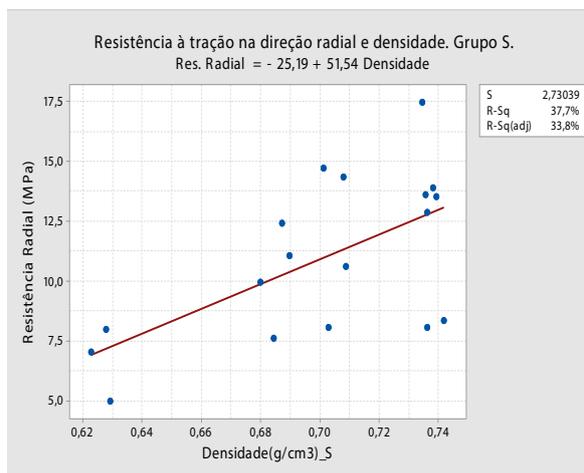
Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Tabela 4 – Análise de variância: Resistência radial versus densidade - Grupo S

Fonte	GL	SS	MS	F	p
Regressão	1	72,144	72,144	9,67	0,01
Erro	16	119,281	7,455		
Total	17	191,425			
Equação: Res. Radial = -25,19 + 51,54 Densidade					
S	R-sq				
2,73039	37,7%				

Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Figura 16 – Relação entre resistência à tração na direção radial e densidade - Grupo S



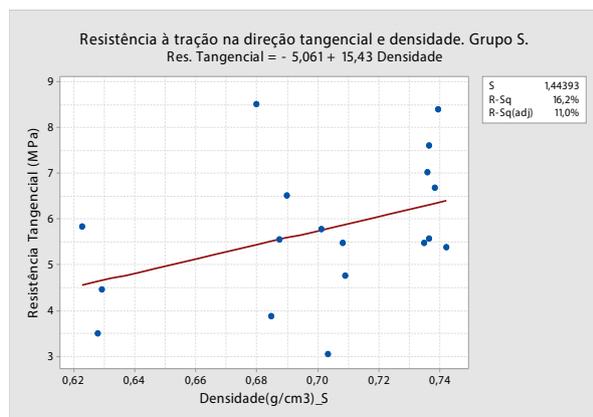
Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Tabela 5 – Análise de variância: Resistência tangencial versus densidade - Grupo S

Fonte	GL	SS	MS	F	p
Regressão	1	6,468	6,468	3,10	0,09
Erro	16	33,358	2,084		
Total	17	39,8274			
Equação: Res. Tangencial = -5,01+ 15,43Densidade					
S	R-sq				
1,44393	16,2%				

Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Figura 17 – Relação entre resistência à tração na direção tangencial e densidade - Grupo S



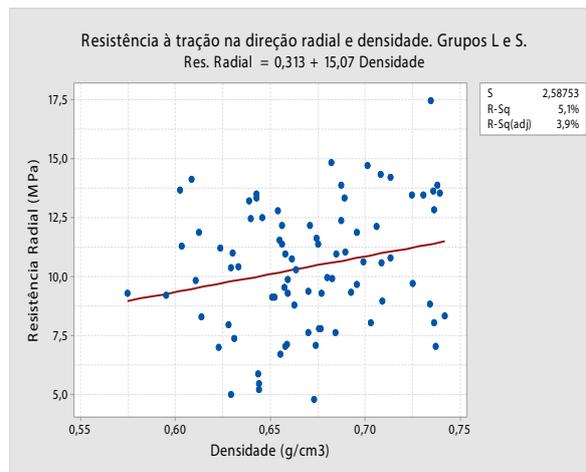
Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Tabela 6 – Análise de variância: Resistência Radial versus densidade - Grupos L e S

Fonte	GL	SS	MS	F	p
Regressão	1	28,859	28,858	4,31	0,04
Erro	81	542,321	6,6953		
Total	82	571,179			
Equação: Res. Radial = 0,313 + 15,07 Densidade					
S	R-sq				
2,586	5,1%				

Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Figura 18 – Relação entre resistência à tração na direção radial e densidade - Grupos L e S



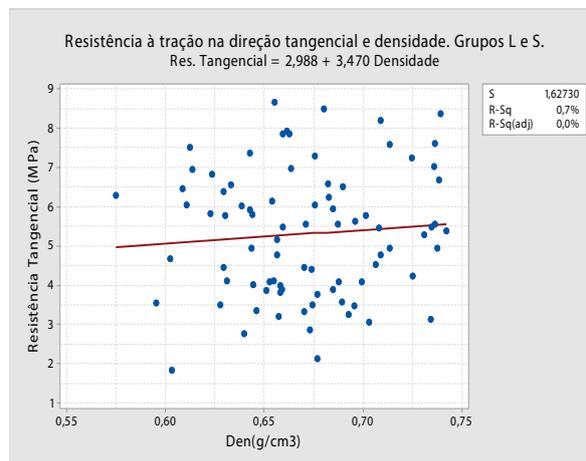
Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Tabela 7 – Análise de variância: Resistência Tangencial versus densidade - Grupos L e S

Fonte	GL	SS	MS	F	p
Regressão	1	1,53	1,53	0,58	0,45
Erro	81	214,49	2,64		
Total	82	216,02			
Equação: Res. Tangencial = 2,98 + 3,47 Densidade					
S	R-sq				
1,62730	0,7%				

Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Figura 19 – Relação entre resistência à tração na direção tangencial e densidade



Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Observa-se que a partir da análise estatística desenvolvida nesse item, a influência da densidade nos valores das resistências à tração perpendiculares às fibras nas direções radial e, principalmente, tangencial pode ser considerada não significativa (mesmo que não seja possível rejeitar a hipótese nula). Percebe-se, no entanto, que, para os resultados do grupo S, com um número menor de resultados e maiores valores de densidades, houve uma aderência maior entre os parâmetros avaliados exibindo uma certa tendência entre o aumento da densidade e o equivalente da resistência.

4.4 Modos de Ruptura

Os modos de ruptura de amostras radiais e tangenciais exibiram separação típica por tensão de tração nas fibras. Além disso, foram observados os efeitos das tensões de cisalhamento em amostras com fibras ligeiramente inclinadas, devido ao posicionamento dessas em relação à tensão aplicada.

Na Figura 20 são apresentados exemplos desses modos de ruptura para a orientação radial e tangencial às fibras da madeira.

Figura 20 – Modos típicos na ruptura de tração perpendicular nas direções tangencial e radial



Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

4.5 Análise numérica

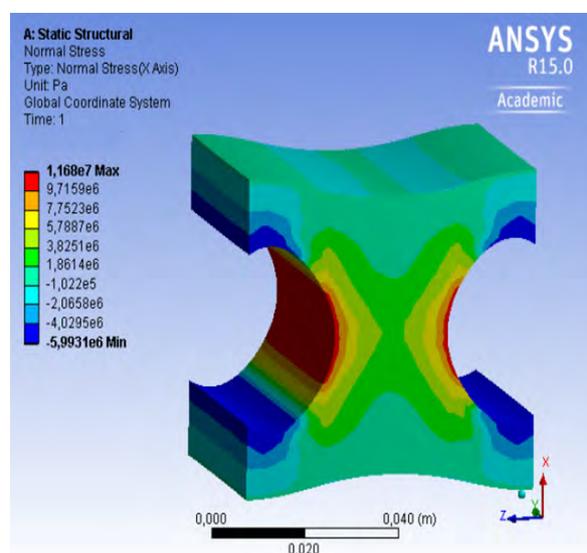
A Figura 21, elaborada utilizando o software Ansys (SAS, 2009), indica as máximas tensões de tração perpendicular às fibras na direção radial e a Figura 22 mostra as deformações associadas a tal estado de tensões.

Verifica-se que essas tensões e deformações máximas ocorrem nas seções em que o processo de ruptura acontece, confirmando os resultados experimentais. As seções se encontram nas regiões central e laterais do corpo de prova.

Na Figura 21 e na Figura 22, as cores em vermelho ilustram os valores máximos de tração, tanto de

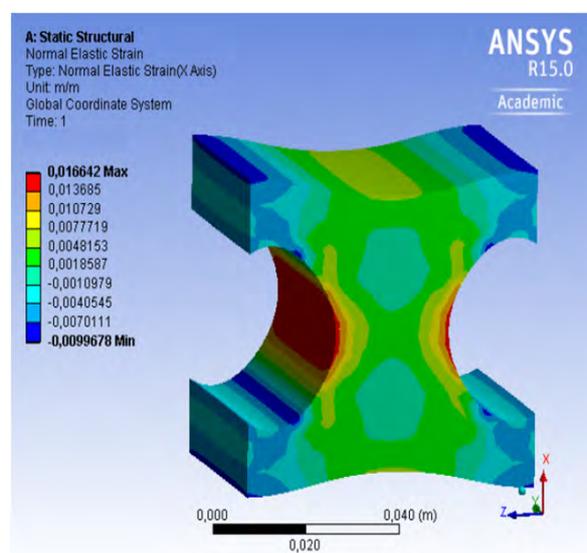
tensões como de deformações. Tais tensões normais quando atingem a situação crítica dão início ao processo de ruptura, observado na Figura 20.

Figura 21 – Distribuição de tensões de tração perpendicular às fibras com corpo de prova com força aplicada na direção radial



Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Figura 22 – Distribuição de deformações de tração perpendicular às fibras com corpo de prova com força aplicada na direção radial



Fonte: Mascia, Kretschmann e Ribeiro (2020).

Os resultados para a direção tangencial são de semelhante padrão e não são apresentadas neste trabalho.

5 Conclusão/Considerações

Foi desenvolvido um estudo experimental investigando-se a resistência à tração perpendicular às fibras, utilizando amostras de *Sugar Maple* e metodologia de ensaio de acordo com a norma ASTM D143 (ASTM, 2014). A partir de análise estatística, pode-se concluir que os resultados obtidos para a resistência à tração perpendicular nas direções radial e tangencial mostram uma diferença estatística significativa entre si.

Além disso, é importante observar a influência da direção da carga aplicada no ensaio de determinação da resistência à tração perpendicular às fibras e verificar se isso também é considerado nas normas técnicas. Por exemplo, ASTM D143 (2014) não indica uma direção preferencial, enquanto a NBR 7190 (ABNT, 1997) usa a direção tangencial para avaliar essa resistência. Bodig e Jayne (1982) indicam a importância de se conhecer a resistência em ambas as direções.

Além disso, a densidade não teve influência estatisticamente significativa nos valores de resistências perpendicular às fibras nas direções radial e tangencial. Não houve um efeito significativo da influência da densidade na resistência à tração perpendicular, mas houve uma tendência de aumento dessa resistência com o aumento da densidade, principalmente nas amostras do grupo S, nas quais as peças tinham maiores densidades.

Em relação aos modos de ruptura para as direções radial e tangencial, observou-se que as rupturas foram típicas por separação das fibras e a análise numérica evidenciou tal processo experimental de início da ruptura.

De um modo geral, este trabalho pretendeu contribuir para ampliar o conhecimento do comportamento de peças de madeira submetidas à tração perpendicular às fibras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Forest Products Laboratory-Madison, WI, Estados Unidos e à Fapesp, Fundação de Pesquisa de São Paulo, Brasil, pelo apoio institucional e financeiro para desenvolvimento dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR 7190 – projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.
- ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D143: standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber**. Philadelphia, PA (US), 2014.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York (US): Van Nostrand, 1982.
- CEN. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Brussels. **EUROCODE 5: design of timber structures – Part 1.1: general rules and rules for buildings**. Brussels (Belgium), 2004.
- FORTIN-SMITH, J. *et al.* Characterization of maple and ash material properties for the finite element modeling of wood baseball bats. **Applied Science**, v.8 (11), 2256, 2018.
- FRANKE, S.; FRANKE, B.; HARTE, A. M. Failure modes and reinforcement techniques for timber beams - state of the art. **Construction and Building Materials**, v. 97, p.2–13, 2015.
- FUSCO, P. B. **Resistência dos materiais anisotrópicos**. In: 1º ENCONTRO REGIONAL EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1993, São Paulo. Anais... São Paulo: USP, 1993. v.1, p. 159-188.
- HELANDERSSON, S.; LARSEN, H. J. **Timber engineering**. London (United Kingdom): Wiley, 2003.
- KRETSCHMANN, D. E. **Influence of juvenile wood content on shear parallel, compression, and tension transverse to grain strength and mode I fracture toughness for loblolly pine**. Research Paper FPL-RP-647. Madison: U.S. Department of Agriculture: Forest Service: Forest Products Laboratory (US), 2008.
- KRETSCHMANN D. E.; BRIDWELL J. J.; NELSON T. C. Effect of changing slope of grain on ash, maple, and yellow birch bending strength. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 11., 2010, Riva Del Garda (Italy). **Proceedings...** Riva Del Garda (Italy): Curran Associates, Inc (US), 2010. p. 1-10.
- MASCIA, N. T. **Estudo de parâmetros de elasticidade e de resistência da madeira para utilização na análise de vigas de madeira**

laminada colada reforçadas por fibras. Relatório de pós-doutorado. Madison (Estados Unidos): Fapesp: Forest Products Laboratory, 2015.

MASCIA, N. T.; LAHR, F. A. R. Remarks on orthotropic elastic models applied to wood. **Materials Research-Ibero-american Journal of Materials**, v. 9, n.3, p. 1-10, 2006.

MASCIA, N. T.; SIMONI, R. A. Analysis of failure criteria applied to wood. **Engineering Failure Analysis**, v. 35, p. 703-712, 2013.

MASCIA, N. T.; KRESTCHMANN, D.; RIBEIRO, A. Evaluation of tension perpendicular to grain strengths in small clear samples of sugar maple for radial, tangential and 45-degree loading directions. **Materials Research-Ibero-american Journal of Materials**, v. 23, p. 1-14, 2020.

NICOLAS, E. A. **Critérios de resistência de materiais anisotrópicos aplicados à madeira.** 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

RIBEIRO A.; MASCIA, N. T. Numerical and experimental study of shear stress behavior of NBR and ASTM standard test specimens for FRP-wood bonds. **Composite Structures**, v. 224, p. 1-14, 2019.

RYAN, B. F.; JOINER B. L. **Minitab 5:** Minitab Handbook. Belmont (US): Duxbury Press, 1994.

SAS. SWANSON ANALYSIS SYSTEMS INC. **ANSYS Reference Manual (version 12).** Canonsburg, US: Ansys Inc., 2009.

WOOD HANDBOOK. **Wood as an engineering material General Technical.** Report FPL-GTR-190. Madison (U.S.): Department of Agriculture: Forest Service: Forest Products Laboratory (US), 2010.