


Influência da posição dos anéis de crescimento da madeira na determinação de sua resistência ao cisalhamento paralelo às fibras

Influence of growth rings position of wood on the determination of its shear strength parallel to the fibers

Edson Fernando Castanheira Rodrigues 

Victor Almeida De Araujo 

Felipe Nascimento Arroyo 

João Paulo Boff Almeida 

André Luis Christoforo 

Francisco Antonio Rocco Lahr 

Resumo

A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}) é de extrema importância no projeto de estruturas de madeira. Logo, devido à falta de informações a respeito de uma possível variação na f_{v0} de espécies folhosas de acordo com o plano de aplicação de carga em relação a seus anéis de crescimento/raios, este trabalho realizou ensaios para a determinação da f_{v0} de acordo com a NBR 7190-3 (ABNT, 2022b), variando-se planos de carga. O carregamento foi aplicado no plano longitudinal tangencial (LT) e longitudinal radial (LR) das espécies de caixeta (*Simarouba amara*) e roxinho (*Peltogyne* spp.). Por meio da análise de variância (5% de significância), os resultados não apontaram diferença estatística entre os valores da f_{v0} quando se variou o plano de carga. Portanto, a f_{v0} dessas espécies pode ser determinada sem que haja risco significativo de minoração de acordo com a disposição dos raios/anéis. Além disso, foi determinada uma relação de $f_{v0,k}/f_{c0,k}$ igual a 0,23 e 0,38 para o roxinho e a caixeta, respectivamente. Assim, esse resultado corrobora a necessidade de se caracterizar a madeira de espécie pouco conhecida quando recebida na obra, de modo a gerar economia e/ou segurança.

¹Edson Fernando Castanheira Rodrigues

¹Universidade Federal de São Carlos
São Carlos - SP - Brasil

²Victor Almeida De Araujo

²Universidade Estadual Paulista
Itapeva - SP - Brasil

³Felipe Nascimento Arroyo

³Universidade Federal de São Carlos
São Carlos - SP - Brasil

⁴João Paulo Boff Almeida

⁴Universidade Federal de São Carlos
São Carlos - SP - Brasil

⁵André Luis Christoforo

⁵Universidade Federal de São Carlos
São Carlos - SP - Brasil

⁶Francisco Antonio Rocco Lahr

⁶Universidade de São Paulo
São Carlos - SP - Brasil

Recebido em 02/03/22
Aceito em 21/09/22

Palavras-chave: Resistência ao cisalhamento. Plano longitudinal tangencial. Plano longitudinal radial. Caracterização mecânica. Espécies não usuais. Madeiras folhosas.

Abstract

*Shear strength parallel to the fibers (f_{v0}) is extremely important for the design of timber structures. Then, due to the lack of information related to a possible variation in the f_{v0} of hardwood species according to the load application plane in relation to its growth rings/rays, this work performed tests for the determination of f_{v0} according to NBR 7190-3 (ABNT, 2022b) varying load planes. Thereby, the load was applied on the longitudinal-tangential (LT) and longitudinal-radial (LR) planes of the species of caixeta (*Simarouba amara*) and roxinho (*Peltogyne* spp.). Through variance analysis (5% confidence), results did not point to statistical differences between f_{v0} values when the load plane was changed. Therefore, the f_{v0} of this species can be determined without significant risk of reduction according to ray/ring orientation. Furthermore, it was determined a ratio of $f_{v0,k}/f_{c0,k}$ equal to 0.23 and 0.38 was determined for roxinho and caixeta, respectively. Thus, this result confirms the need for characterizing unfamiliar wood species when received on construction site, in order to save money and/or for safety reasons.*

Keywords: Shear strength. Longitudinal-tangential plane. Longitudinal-radial plane. Mechanical characterization. Unfamiliar species. Hardwoods.

Introdução

A madeira tem um comportamento mecânico diferenciado quando comparada com o concreto e o aço. Suas propriedades mecânicas variam dependendo da orientação em que é solicitada, por possuir diferentes propriedades mecânicas e físicas na direção longitudinal (L), radial (R) e tangencial (T), o que a classifica como um material ortotrópico (LI *et al.*, 2021).

Além disso, as propriedades da madeira podem variar até mesmo dentro de sua direção longitudinal, devido à disposição e configuração dos anéis de crescimento (AC), vasos, fibras (identificadas apenas microscopicamente) e parênquimas axial e radial, se mostrando um material complexo em sua composição anatômica (GUPTA; SINHA, 2012; LONGUI *et al.*, 2017a). A título de ilustração, na Figura 1 pode ser notada parte de tal complexidade pela presença de células de parênquima agrupadas paralelamente (tangencialmente) aos anéis de crescimento da madeira de caixeta (*Simarouba amara* Aubl.), as quais representam um ponto de fragilidade sob o ponto de vista mecânico, visto que se trata de células geralmente não lignificadas, que servem de depósito de diversas substâncias.

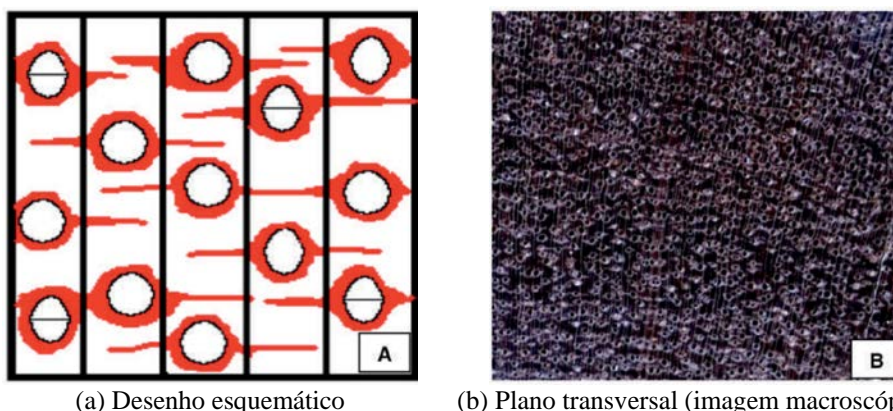
Devido à composição natural, complexa e heterogênea da madeira, é importante que se verifique tanto suas resistências quanto suas rigidezes em direções diferentes de aplicação de carga com relação aos próprios anéis de crescimento da madeira (AKTER; SERRANO; BADER, 2021). Logo, uma importante propriedade mecânica é a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, indispensável para a verificação no estado limite último de ligações (cisalhamento simples) e de peças submetidas à flexão e ao esforço cisalhante (cisalhamento transversal), de acordo com o que estipula a NBR 7190-1 (ABNT, 2022a).

Nesses dois casos, o plano de corte (falha) introduzido pela força cisalhante pode coincidir, por exemplo, com a linha axial de células de parênquima, que, ao mesmo tempo, acompanha o alinhamento dos anéis de crescimento na seção transversal. Já em outro momento, o plano de falha pode acompanhar a orientação dos raios, ou mesmo uma inclinação intermediária entre o alinhamento dos raios e os anéis de crescimento. Lang *et al.* (2000) destacam que a interface mais fraca dentro do volume dos corpos de prova pode ocorrer justamente nessas orientações de aplicação de carga, ou seja, tangencialmente aos anéis de crescimento, nos limites entre o lenho tardio e o juvenil, ou ainda ao longo dos tecidos dos raios (orientação radial).

Assim, apesar da publicação da NBR 7190-1 (ABNT, 2022a), que trata do cálculo e dimensionamento de estruturas de madeira, e da NBR 7190-3 (ABNT, 2022b), que descreve todos os métodos e recomendações de ensaios para a determinação de propriedades físico-mecânicas desse material, tais normativas não levam em consideração possíveis variações que podem haver na resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira de acordo com a alteração do plano de aplicação de carga em relação à disposição dos anéis de crescimento.

Desse modo, como a norma NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) não estabelece qualquer recomendação sobre uma possível influência no valor médio da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras de qualquer madeira de espécies folhosas quando solicitada na direção tangencial [$f_{v0,par}$] e/ou perpendicular (radial) [$f_{v0,per}$] a seus anéis de crescimento, assume-se que a norma brasileira considere que tal propriedade mecânica não é afetada quando planos diferentes de carregamento são utilizados, o que justifica o tema desta pesquisa.

Figura 1 - Representação das células de parênquima da espécie de caixeta



Fonte: Santini Júnior, Florsheim e Tommasiello Filho (2021).

A pesquisa ainda almejou realizar ensaios para a determinação da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) de espécies folhosas, de forma que fosse possível analisar a relação entre valores característicos na compressão ($f_{c0,k}$) e no cisalhamento ($f_{v0,k}$) paralelos às fibras. Tal comparativo foi realizado para que a relação ($f_{v0,k} = 0,12 * f_{c0,k}$), sugerida pela norma NBR 7190 (ABNT, 1997) e ainda implícita na NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) para a caracterização simplificada de espécies folhosas usuais, fosse testada para duas espécies ainda pouco conhecidas desse grupo vegetativo.

Referencial teórico

Ao se realizar uma busca inicial pelas espécies selecionadas neste trabalho, caixeta (*Simarouba amara*) e roxinho (*Peltogyne* spp.), algumas pesquisas determinaram apenas seus valores médios de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, sem qualquer comparativo que levasse em conta a orientação de aplicação do carregamento na seção transversal de acordo com a disposição dos anéis de crescimento.

Pôde-se notar que os valores médios encontrados para a espécie de caixeta foram bem próximos de pesquisa para pesquisa, como os valores determinados por Araújo (2007) [6,96 MPa], Duarte (2017) [6 MPa] e IPT (INSTITUTO..., 2021a) [7 MPa]. Esses mesmos trabalhos determinaram a resistência ao cisalhamento paralelo para a espécie roxinho, e o resultado encontrado em Araújo (2007) [18,14 MPa] se aproximou do divulgado em Duarte (2017) [20,00 MPa], apesar de ser mais distante do encontrado pelo IPT (INSTITUTO..., 2021b) [14,90 MPa], que ensaiou essa espécie em condição de madeira verde, justificando, assim, o valor menor. É importante também ressaltar que não foram encontrados valores característicos da resistência ao cisalhamento paralelo para essas duas espécies folhosas.

Com relação aos valores médios da resistência à compressão paralela às fibras determinados para a espécie caixeta, também foram bem próximos de pesquisa para pesquisa, como pode ser visto em Almeida (2017) [30,00 MPa], Araújo (2007) [33,05 MPa], Duarte (2017) [31,00 MPa] e IPT (INSTITUTO..., 2021a) [33,00 MPa]. Com relação à classificação mecânica, Souza, Bufalino e Gomes (2020) enquadraram essa espécie como pertencente à classe D20. Com relação ao roxinho, os valores médios apresentados por Almeida (2017) [86 MPa] para a espécie *Peltogyne* sp., por Araújo (2007) [90,52 MPa] para a espécie *Peltogyne paniculata* e pelo IPT (INSTITUTO..., 2021b) [84,1 MPa para um teor de umidade de 15%] para a espécie *Peltogyne confertiflora* foram próximos, apesar de se distinguirem mais do resultado apresentado por Duarte (2017) [72 MPa] para a espécie *Peltogyne recifenses*. Ainda no trabalho de Almeida (2017), o roxinho foi também enquadrado na classe de resistência D60.

Em seguida, como não se encontrou qualquer estudo sobre o tema principal aqui abordado para as espécies do trabalho, partiu-se para uma busca focada no tema desta pesquisa que envolvesse quaisquer espécies que tivessem sido testadas em relação ao cisalhamento, levando-se em conta a disposição dos anéis de crescimento. Subsequentemente, foram encontradas pesquisas próximas do tema, como as de Liu e Floeter (1984), Liu *et al.* (1999), Gupta e Sinha (2012), Logsdon, Finger e Jesus (2014) e Carrasco e Mantilha (2016), que demonstram em tabelas os valores encontrados em ensaios da resistência ao cisalhamento com a aplicação de carregamento na direção paralela versus normal às fibras da madeira, bem como comparativos com valores da resistência em inclinações intermediárias. Também foram encontrados trabalhos que investigaram a relação entre a resistência ao cisalhamento paralelo versus a anatomia da madeira, porém sem que se variasse o plano de carregamento (AJUZIUGU *et al.*, 2014; TOONG *et al.*, 2014; LONGUI *et al.*, 2017a; LUOSTARINEN; HERÄJÄRVI, 2018).

Ainda, foram encontradas pesquisas que mostram como a disposição dos anéis de crescimento podem afetar em outros tipos de propriedades mecânicas que não a resistência ao cisalhamento, como em Mascia e Nicolas (2013) [coeficiente de Poisson], Nadir, Nagarajan e Midhun (2014) [outras propriedades mecânicas], Niemz *et al.* (2014) [outras propriedades mecânicas e físicas] e Labonnote e Malo (2010) [rigidez efetiva].

Já exatamente no tema aqui apresentado e estudado, os trabalhos de Bendtsen e Porter (1978), Bröker, Meierhofer e Radovic (1987), Okkonen e River (1988), Szalai (1994), Riyanto e Gupta (1996), Lang *et al.* (2000), Müller *et al.* (2004), Horvath, Niemz e Molnar (2008), Hass *et al.* (2009), Labonnote e Malo (2010), Sonderegger *et al.* (2013), Nadir, Nagarajan e Midhun (2014), Ozyhar *et al.* (2016) e Longui *et al.* (2017b) foram encontrados.

Em alguns desses trabalhos a nomenclatura adotada para as resistências nos planos principais de análise foi a seguinte: τ_{xx} , sendo τ a resistência ao cisalhamento, o primeiro “x” subscrito a direção normal ao plano cisalhado, e o segundo a direção de aplicação da força cisalhante. Essa mesma lógica foi seguida também por outros trabalhos para descrever o tipo de ensaio, sem necessariamente se falar na resistência, como os ensaios nos planos TL ou RL (primeira letra indica a direção normal à falha, e a segunda indica a direção da força). Já

em outras pesquisas a nomenclatura adotada foi a que indica exatamente o plano de aplicação do carregamento, começando-se sempre com a letra que indica a direção de aplicação de força e encerrando-se com a letra que representa a direção do cisalhamento na seção transversal, como o plano LT, que significa que a força está orientada (apontada) na longitudinal e que a linha de carregamento tangencia os anéis de crescimento (direção tangencial).

Assim, Bendtsen e Porter (1978) analisaram as resistências médias ao cisalhamento com o plano cisalhado perpendicular aos anéis de crescimento (cortando a direção tangencial) e com a direção de aplicação de força orientada na longitudinal ou paralela às fibras [τ_{TL}]; com o plano cisalhado perpendicular aos raios (cortando os raios) e com o carregamento orientado na longitudinal (τ_{RL}); e com o plano cisalhado a 45° em relação aos anéis de crescimento e com a força aplicada na longitudinal ($\tau_{45^\circ ACL}$) da madeira de *Pseudotsuga menziesii* (abeto-de-douglas) [conífera]. Logo, a pesquisa descobriu que a τ_{TL} era maior do que a τ_{RL} , além das τ_{TL} e τ_{RL} serem apenas de 2% a 3% maiores do que a $\tau_{45^\circ ACL}$ encontrada. A pesquisa ainda afirmou que essa diferença se deu por conta do fato de a densidade básica média ser ligeiramente inferior na orientação de 45° em relação aos AC.

Para algumas espécies também de coníferas, Bröker, Meierhofer e Radovic (1987) chegaram à conclusão de que a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras com carregamento aplicado no plano LR (τ_{TL}) é maior do que quando o carregamento é aplicado no plano LT (τ_{RL}). Essas madeiras mostraram grandes diferenças de densidade entre o lenho inicial e o final, o que explica o porquê da falha mais frágil ocorrer tangencialmente aos AC.

Okkonen e River (1988) avaliaram a influência causada no valor de τ_{RL} para o τ_{TL} na seção transversal de quatro espécies diferentes:

- (a) *Pinus* spp. (pinheiro-do-sul) [conífera];
- (b) *Pseudotsuga menziesii* (abeto-de-douglas) [conífera];
- (c) *Quercus alba* (carvalho-branco) [folhosa]; e
- (d) *Acer saccharum* (bordo) [folhosa].

Por meio de ensaios realizados de acordo com os métodos da D 143 (AMERICAN..., 1952) e da D 905 (AMERICAN..., 1986), o trabalho encontrou que a τ_{RL} foi maior do que a τ_{TL} em espécimes de bordo e carvalho. Diferentemente, a τ_{TL} foi superior do que a τ_{RL} em espécimes de abeto-de-douglas e pinheiro-do-sul. A pesquisa ainda afirma que essas diferenças foram estatisticamente significativas quando se variou a orientação do carregamento na seção transversal dessas espécies, apesar de a curvatura do anel de crescimento com relação à distância da medula influenciar mais a resistência ao cisalhamento do que propriamente a localização dos raios.

Em um trabalho abrangente, Szalai (1994) usou a teoria do tensor ortotrópico para descrever a resistência e a elasticidade da madeira como sendo dependentes da direção de análise. Com base nos critérios de resistência de Ashkenazi (1976), o autor aplicou uma abordagem de tensor quadridimensional para prever a resistência ao cisalhamento em qualquer plano oblíquo da madeira e em qualquer direção de aplicação do carregamento cisalhante.

Ao substituir os componentes tensores pelos valores de resistência adequados, eliminando os componentes zero, resultantes da restrição de que o cisalhamento é aplicado apenas nos planos paralelos à grã, a equação ficou em função de quatro variáveis, que são obtidas de forma experimental, sendo elas as seguintes resistências ao cisalhamento: τ_{RL} , τ_{TL} , τ_{RT} (tensão cisalhante com a aplicação da força na direção tangencial e com o plano de falha normal aos raios) e $\tau_{90^\circ/45^\circ}$ (resistência ao cisalhamento com a força aplicada a 90° das fibras e a 45° dos anéis de crescimento). Além dessa equação, ainda foram criados modelos para prever as resistências normal e paralela às fibras da madeira através das resistências τ_{RL} e τ_{TL} , porém nenhuma dessas equações foi experimentalmente validada e, como se sabe, devido ao modo imprevisível de ruptura da madeira no cisalhamento, elas precisam ser amplamente verificadas (SZALAI, 1994).

Riyanto e Gupta (1996) analisaram a influência na resistência ao cisalhamento das espécies de coníferas de *Pseudotsuga menziesii* (douglas-fir) e *Larix gmelinii* (lariço) de acordo com a variação do plano de carga, que girou do plano longitudinal tangencial (LT) até o longitudinal radial (LR) na seção transversal, com um incremento de 10° por ensaio/inclinação. Como resultado, tal pesquisa encontrou que, para os casos de maior inclinação (90°), a máxima variação na resistência ao cisalhamento foi igual a 5%, demonstrando, assim, baixíssima influência dos anéis de crescimento. Em contrapartida, a pesquisa encontrou que a densidade básica média, a porcentagem de lenho tardio e o número de anéis por polegada foram fatores muito mais determinísticos.

Ao se investigarem as espécies folhosas exóticas de *Populus tremuloides* (álamo-trémulo), *Quercus rubra* (carvalho-vermelho), *Liriodendron tulipifera* (tulipeiro), *Populus x. Euramericana cv. Pannonia* (álamo-verdadeiro) e *Quercus cerris* (carvalho-turco) com relação a suas resistências ao cisalhamento com incrementos de 15° na inclinação de aplicação da força tanto com relação à grã quanto com relação aos anéis de crescimento, Lang *et al.* (2000) encontraram que os valores máximos de resistência ao cisalhamento seguiram forte tendência de serem obtidos a 15° da grã dessas madeiras. Para uma inclinação a 0° dos anéis de crescimento, a resistência só não foi máxima a 15° da grã da espécie de carvalho-turco. A pesquisa ainda levanta a hipótese de que essa tendência pode ser explicada por conta do fato de a distribuição de tensão de cisalhamento se tornar mais uniforme a 15° do que a 0° da grã, sendo que nessa última inclinação haveria maior concentração de tensão próxima aos nós da madeira, entre outros fatores possíveis.

Com relação aos modos de falha, nem sempre foram encontradas rupturas devido ao cisalhamento puro. Portanto, acima de 45° da grã, por exemplo, a madeira de carvalho, que apresenta anel poroso, tendeu a falhar ao longo da interface entre o lenho primaveril e o lenho tardio (direção tangencial), ou ao longo do parênquima do raio (direção radial). Por meio de ANOVA bidirecional, foram constatadas também diferenças estatísticas significativas na resistência ao cisalhamento tanto quando se variou o plano cisalhado com relação aos anéis de crescimento, como quando se variou a direção da força com relação à grã de todas as espécies. Com relação aos anéis, os maiores valores foram encontrados próximos ou paralelos a eles (LANG *et al.*, 2000).

Müller *et al.* (2004) analisaram a influência da posição dos anéis de crescimento (TL versus RL) na resistência ao cisalhamento paralelo às fibras das madeiras de *Larix decidua* (larisso-europeu) e de *Picea abies* (abeto-falso), pertencentes ao grupo vegetativo das coníferas. Após a realização dos ensaios de acordo com o modo II proposto por Bodig e Jayne (1982), a análise de variância (ANOVA) ao nível de 5% de significância não apontou diferença estatística entre os valores amostrais nos dois planos de falha investigados. Com relação aos planos analisados para a madeira de lenho normal, o sistema TL de ensaio resultou no modo de falha em que houve a ruptura da seção transversal dos traqueídes do lenho inicial ou do lenho tardio quando este não se encontrava entre raios. Já quando o lenho tardio se encontrava entre raios, o modo de falha se deu com a ruptura intraparede (entre a lamela média e a parede S1). Por outro lado, com relação ao sistema RL da madeira de lenho normal, o único modo de falha obtido foi na seção transversal dos traqueídes do lenho inicial. Ademais, no que diz respeito à madeira de lenho de compressão, a ruptura se deu sempre intraparede tanto para o plano TL como para o RL.

Diferentemente do que foi constatado por Bendtsen e Porter (1978), Bröker, Meierhofer e Radovic (1987) e Okkonen e River (1988) para as espécies de abeto-de-douglas e pinheiro-do-sul, Horvath, Niemz e Molnar (2008) encontraram que a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras foi maior com o plano de carregamento LT do que quando se solicitaram os corpos de prova no plano LR da espécie de madeira de *Fagus sylvatica* L. (faia) [folhosa]. A razão de tal resultado é dada por conta da distribuição poroso-difusa de seus vasos, o que faz com que a diferença de densidade entre as camadas de crescimento seja praticamente nula, enquanto a presença dos raios reforçou a madeira quando a carga foi aplicada no plano LT.

Nesse mesmo sentido, ao se realizarem ensaios de cisalhamento de acordo com a norma EN 302-1 (DEUTSCHES..., 2004) para a determinação da resistência de três tipos de adesivos diferentes usados em ligações, Hass *et al.* (2009) observaram que, quando a falha se deu na madeira de faia, e não propriamente na linha de cola, a resistência ao cisalhamento foi maior quando esse material foi carregado no plano LT ou em inclinações não maiores que 30° do alinhamento com os anéis de crescimento do que quando solicitada no plano LR ou em uma inclinação maior ou igual a 30°. O motivo para isso foi alegado mais uma vez como sendo o reforço ocasionado pelos raios na direção tangencial da seção, estando, assim, em concordância com Horvath, Niemz e Molnar (2008).

Sonderegger *et al.* (2013) analisaram, entre outras propriedades, a influência que a aplicação da carga em planos diferentes acarreta na resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira de *Acer pseudoplatanus* L. (bordo) [folhosa]. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma alemã DIN 52187 (DEUTSCHES..., 1979), e os resultados destacaram que o plano de cisalhamento LR (cortando os anéis) obteve resistência ao cisalhamento claramente superior ao valor encontrado no plano LT (cortando os raios); logo, diferindo do divulgado em Okkonen e River (1988).

Em um estudo amplo, Nadir, Nagarajan e Midhun (2014) quantificaram, entre outras propriedades da espécie de *Hevea brasiliensis* (seringueira) [folhosa], a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras de corpos de prova em formato de blocos (AMERICAN..., 2009), e também de espécimes de iosipescu (SZALAI 1992; AMERICAN..., 1999). Assim, foi encontrado que para o corpo de prova da ASTM (2009) [mesma configuração do espécime da NBR 7190-1 (ABNT, 2022a)], o valor médio da resistência ao cisalhamento foi maior no plano TL (cortando os anéis) do que no RL (raios cisalhados), além de os valores amostrais serem

significativamente diferentes de um plano para o outro de acordo com o teste t ao nível de 5% de significância realizado.

Ozyhar *et al.* (2016) determinaram, entre outras propriedades, a resistência ao cisalhamento da espécie de *Quercus robur* (carvalho) [folhosa] por meio de ensaios prescritos na norma DIN 52187 (DEUTSCHES..., 1979) para os planos TL (cortando os anéis) e RL (cortando os raios) paralelos às fibras, além de outros dois planos perpendiculares à grã da madeira. Como resultado, a pesquisa encontrou que, principalmente quando a madeira atinge teores de umidade próximos de 12%, a resistência ao cisalhamento é maior para o plano TL, discordando, assim, do encontrado por Okkonen e River (1988) para uma espécie do mesmo gênero (*Quercus alba*).

Longui *et al.* (2017b) determinaram a influência que a orientação do raio tem sobre a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras das madeiras de *Balfourodendron riedelianum* (guatambu-branco), *Dipteryx alata* (cumaru), *Myracrodruon urundeuva* (aroeira) e *Peltophorum dubium* (canafístula), todas folhosas. Os ensaios foram conduzidos de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997), e os resultados da resistência média dessas espécies mostraram que não houve diferença estatística quando os raios foram orientados paralelamente na comparação com os orientados perpendicular ou diagonalmente ao plano de carga. Em suma, apesar de não haver diferenças estatísticas válidas para essa comparação, de modo geral as madeiras apresentaram os máximos valores de resistência ao cisalhamento quando os raios foram orientados perpendicularmente ao plano cisalhado, enquanto as menores resistências foram encontradas com os raios orientados paralelamente ao plano de corte. A explicação para isso foi a de que as camadas de crescimento não deslizaram umas sobre as outras por terem sido travadas pelos raios, como se estes atuassem como parafusos.

Já ao se levar em consideração o crescimento secundário do lenho, Luostarinen e Heräjärvi (2018) sugeriram que a mudança nas propriedades viscoelásticas que ocorre nas paredes celulares durante a transformação de alburno para cerne da madeira de *Larix sibirica* (lariço-siberiano) [conífera] melhora suas propriedades de cisalhamento, levando não apenas a falhas tangenciando os anéis de crescimento, como no caso do alburno, mas também a falhas no alinhamento dos raios (cerne). Dentro dessa mesma lógica, Li *et al.* (2021) afirmaram que, quando a madeira do lenho inicial da espécie de *Larix kaempferi* (lariço-japonês) [conífera] tinha o ângulo da microfibrila mais inclinado, a espessura da parede das fibras mais fina e menor densidade que a madeira do lenho tardio, este último apresentou melhor desempenho no cisalhamento para o plano RL.

Ressalta-se que não foi encontrado outro trabalho nessa temática que envolva as madeiras tropicais selecionadas para este trabalho. Na realidade, como bem apontou Aicher, Ahmad e Hirsch (2018), a literatura fornece dados consistentes para esse tipo de estudo envolvendo madeiras de coníferas, mas não para espécies folhosas, e, uma vez que a anatomia das madeiras desses grupos vegetativos se diferenciam, como os vasos e as fibras presentes nas folhosas em contrapartida dos traqueídes nas coníferas, não é aconselhável que determinações experimentais em espécies do grupo das coníferas sirvam de regra geral para espécies tropicais. Na verdade, as magnitudes e as razões dos parâmetros mecânicos entre as três direções anatômicas principais da madeira diferem e dependem fortemente da microestrutura individual de cada espécie, e não apenas de seu grupo vegetativo (NIEMZ *et al.*, 2014). Em suma, percebe-se pelo estado atual do conhecimento que nem foi possível definir ainda algum padrão consistente para a influência da resistência ao cisalhamento entre espécies de folhosas de acordo com a disposição de seus anéis de crescimento.

Logo, dadas a importância da resistência ao cisalhamento no projeto de estruturas de madeira e a falta de informações que se têm a respeito de possíveis interferências da anatomia da madeira em tal tipo de solicitação, essa pesquisa procurou avaliar, por meio de ensaios de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras de acordo com a NBR 7190-3 (ABNT, 2022b) e por meio de análise de variância (ANOVA), se a resistência ao cisalhamento tem equivalência estatística quando a carga é aplicada tangencialmente versus perpendicularmente (direção radial) aos seus anéis de crescimento.

Além disso, os valores amostrais da resistência na compressão paralela às fibras foram determinados para que valores característicos na compressão ($f_{c0,k}$) e no cisalhamento ($f_{v0,k}$) das espécies de caixeta e roxinho fossem calculados com o intuito de se comparar a relação de $f_{v0,k}/f_{c0,k}$ obtida para cada uma dessas espécies ainda pouco conhecidas com a empregada pela NBR 7190 (ABNT, 1997) [$f_{v0,k} = 0,12 * f_{c0,k}$] e implicitamente contida na NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) para qualquer espécie usual do grupo das folhosas. Assim, procurou-se validar essa estimativa visando à segurança e à economia do projeto estrutural, além de se evidenciar a necessidade ou não da caracterização mínima requerida pela norma brasileira para espécies pouco conhecidas.

Nesse contexto, destaca-se que, para essa razão ser utilizada, se admite que os valores médios de resistência no cisalhamento e na compressão da amostra não apresentem valores de coeficiente de variação (CV) maiores que 28% e 18% respectivamente, de forma a respeitar a calibração realizada pela NBR 7190 (ABNT, 1997), ainda mantida na NBR 7190-1 (ABNT, 2022a), para que se alcance tal relação ($f_{v0,k} = 0,12 * f_{c0,k}$). Logo, é

importante mencionar que, a partir desses CV, tal calibração foi realizada considerando-se para o cisalhamento e a compressão o disposto na Equação 1. Assim, ao se substituir o CV de 28% e de 18% nessa equação para se determinar o valor característico na compressão e no cisalhamento respectivamente, têm-se $f_{v0,k} = 0,54.f_{v0,m}$ e $f_{c0,k} = 0,70.f_{c0,m}$.

$$f_{w0,k} = f_{w0,m}(1 - 1,645CV) \quad \text{Eq. 1}$$

Por fim, para se alcançar uma relação entre valores de projeto de $f_{v0,d} = 0,10.f_{c0,d}$ disposta na NBR 7190-1 (ABNT, 2022a), sabe-se pela NBR 7190 (ABNT, 1997) que $f_{v0,m} = 0,16.f_{c0,m}$. Logo, ao se substituir esta última relação na Equação 2, o resultado encontrado é o de $f_{v0,k} = 0,12*.f_{c0,k}$.

$$\frac{f_{v0,k}}{f_{c0,k}} = \frac{0,54f_{v0,m}}{0,70f_{c0,m}} \quad \text{Eq. 2}$$

Material e método

Para os ensaios em que foram obtidas as resistências ao cisalhamento e compressão paralela às fibras, as espécies de caixeta (*Simarouba amara*) e roxinho (*Peltogyne* spp.) foram utilizadas. O critério de escolha das duas espécies do trabalho se deu com base principalmente em suas diferenças anatômicas, como as contidas na Tabela 1, apesar de essa tabela também apresentar similaridades importantes entre elas. Além disso, ressalta-se que as espécies também foram escolhidas por serem do mesmo grupo vegetal (folhosas) e de acordo com a disponibilidade apresentada no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos, da USP (EESC-USP).

Subsequentemente, os corpos de prova (CP) ensaiados foram retirados de lotes de madeira com um volume máximo igual a 12 m³, para garantir sua homogeneidade de acordo com o que estipula a NBR 7190-3:2022. Além disso, os CP foram retirados das vigas de madeira de forma aleatória, porém sempre afastados de regiões próximas às extremidades. Assim, garantiu-se que as amostras fossem representativas de todo o lote e que não houvesse grandes variações do valor da propriedade a ser analisada. Em seguida, após a obtenção dos corpos de prova com os critérios relatados, esses espécimes foram inspecionados visualmente para que se fossem escolhidos os isentos de defeitos, mais uma vez evitando-se que houvesse variações nos valores encontrados e que se subestimasse a verdadeira resistência do corpo de prova (CP).

Destaca-se que as madeiras foram devidamente estocadas à temperatura de 20 °C e à umidade relativa do ar igual a 65%, garantindo que a umidade de equilíbrio (UE = 12%) desses corpos de prova fosse atingida, conforme recomenda a NBR 7190-3 (ABNT, 2022b). Os valores característicos da resistência ao cisalhamento e da compressão das espécies do trabalho também foram determinados de acordo com o que estipula essa norma por meio da Equação 3, onde os resultados de resistência dos CP devem ser colocados em ordem crescente, $f_{w0,1} \leq f_{w0,2} \leq \dots \leq f_{w0,n}$, desprezando-se o valor mais alto se o número de corpos de prova for ímpar, além de não se tomar para $f_{w0,k}$ valor inferior a $f_{w0,1}$, nem a 70% da média dos resultados ($f_{w0,m}$).

$$f_{w0,k} = 1,1 \left(2 \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{\frac{n}{2} - 1} - x_{\frac{n}{2}} \right) \quad \text{Eq. 3}$$

Já no sentido de se esclarecer sobre a realização dos testes tanto de cisalhamento como de compressão, ambos paralelos às fibras, esses foram realizados em máquina AMSLER com capacidade de 250 KN, que se encontra ilustrada na Figura 2. Assim, à frente foram descritos os passos e critérios específicos para a realização dos ensaios de compressão e de cisalhamento de acordo com a NBR 7190-3 (ABNT, 2022b). A análise estatística realizada para avaliação dos resultados no cisalhamento também é apresentada.

Ensaio de compressão paralela às fibras

Segundo a NBR 7190-3 (ABNT, 2022b), a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) é dada pela máxima tensão de compressão, que pode atuar em um corpo de prova com seção transversal quadrada de 5,0 cm de lado (base e altura) e 15,0 cm de comprimento (paralelo às fibras), ou seja, a razão da máxima força de compressão aplicada ($F_{c0,máx}$) pela área inicial da seção transversal comprimida (A) do corpo de prova prismático quadrado, conforme a Equação 4.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,máx}}{A} \quad \text{Eq. 4}$$

Tabela 1 - Principais características anatômicas das duas espécies do estudo

Características anatômicas	Caixeta	Roxinho
Parênquima axial	VON	VASL10x
Parênquima radial	PN	PN
Diâmetro dos vasos	P-M	M-G
Porosidade	DIFUSA	DIFUSA
Fibras	PD-LM	PE-LD
Camadas de crescimento	DZF	DZF

Fonte: adaptada de IPT (INSTITUTO..., 2021a, 2021b), Santini Junior, Florsheim e Tommasiello Filho (2021) e Zaque e Melo (2019).

Nota: Legenda:

- VON = visível a olho nu;
- VASL10x = visível apenas sob lente de 10x de aumento;
- PN = pouco numeroso;
- P-M = de pequeno a médio;
- M-G = de médio a grande;
- PD-LM = parede delgada e lúmen médio;
- PE-LD = parede espessa e lúmen delgado; e
- DZF = demarcadas por zonas fibrosas.

Figura 2 - Máquina AMSLER



Com relação às medidas do corpo de prova, suas arestas foram aferidas com o auxílio de paquímetro com precisão de 0,01 mm, e sua representação está na Figura 3. O arranjo do ensaio pode ser conferido com detalhe na Figura 4. A respeito do procedimento de ensaio, apenas a f_{c0} foi determinada, pois o intuito foi o de se obterem as classes de resistência das espécies do trabalho, sem valores de rigidez/deformação determinados. Cabe destacar também que o carregamento de ensaio foi aplicado de forma monotônica crescente, correspondente a uma taxa de 10 MPa/min, conforme indicado na NBR 7190-3 (ABNT, 2022b).

Sabe-se também que, para a classificação das espécies em classes de resistência, faz-se necessário que seu valor característico de resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) seja conhecido. Logo, o valor característico de cada espécie foi estimado, de acordo com o que estipula a NBR 7190-3 (ABNT, 2022b), por meio da Equação 3. Desse modo, foram utilizados 20 CP de cada espécie para a determinação da resistência na compressão paralela às fibras da madeira, resultando em 40 valores amostrais encontrados e em 2 valores característicos determinados.

Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras

Os corpos de prova ensaiados para a determinação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras foram confeccionados de acordo com as medidas da Figura 5. Além de suas medidas, é importante ilustrar e

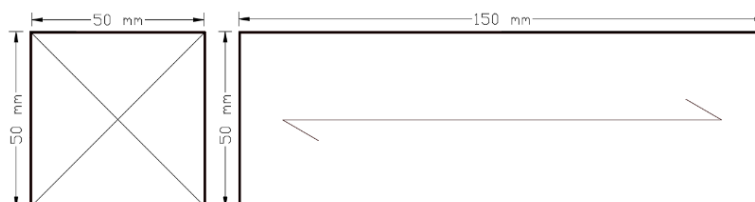
esclarecer sobre os planos de carregamento ensaiados com relação à disposição dos anéis de crescimento das madeiras do trabalho. Na Figura 6 pode-se ver com clareza a orientação desses planos de carregamento nos espécimes das espécies de caixeta e roxinho.

Dessa maneira, 20 CP foram obtidos para cada espécie e para cada uma das duas disposições dos anéis de crescimento (AC) com relação ao plano de aplicação de carga, levando-se a um total de 80 CP ensaiados. Já no sentido de se esclarecer sobre a realização dos testes, a Figura 7 exhibe os corpos de prova das espécies de caixeta e roxinho em situação de ensaio para a determinação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, os quais se encontram fixados na máquina AMSLER de ensaio.

A respeito do procedimento de ensaio, o carregamento foi aplicado de forma monotônica crescente a uma taxa de 2,5 MPa/min. A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}) foi determinada pela razão da máxima força aplicada ($F_{v0,máx}$) sobre a área resistente (A_{v0}) do corpo de prova, conforme dado pela Equação 5. Já o valor da resistência característica foi calculado de acordo com a Equação 3, tendo sido um valor por espécie determinado, visto que não houve diferença estatística no valor da resistência ao cisalhamento quando o plano de carregamento foi alterado na seção transversal do corpo de prova, como pode ser visto em seção à frente.

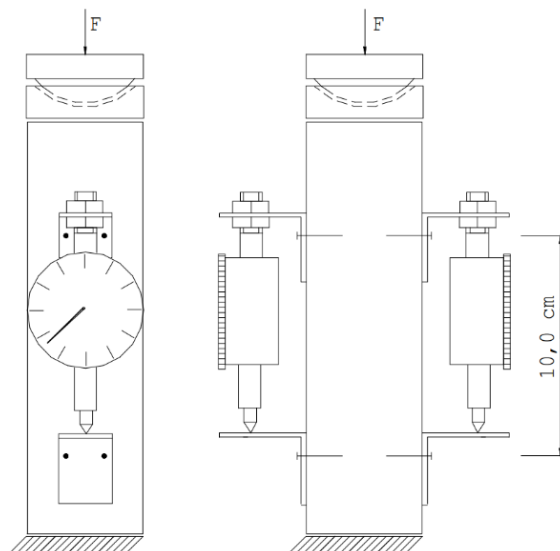
$$f_{v0} = \frac{F_{v0,máx}}{A_{v0}} \tag{Eq. 5}$$

Figura 3 - Corpo de prova para o ensaio de compressão com medidas em milímetro (mm)



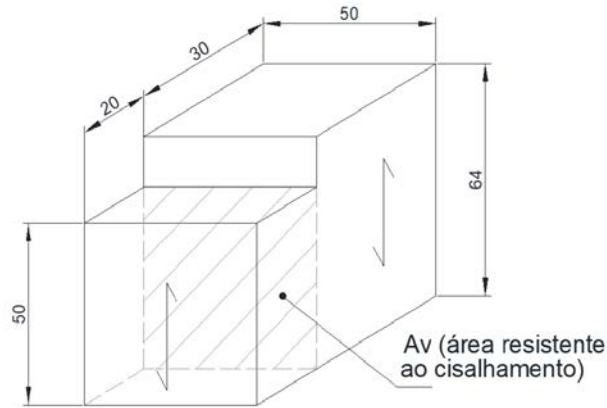
Fonte: adaptada da NBR 7190-3 (ABNT, 2022b).

Figura 4 - Arranjo do ensaio de compressão paralela



Fonte: adaptada da NBR 7190-3 (ABNT, 2022b).

Figura 5 - Corpo de prova com medidas em milímetros



Fonte: adaptada da NBR 7190-3 (ABNT, 2022b).

Figura 6 - Disposição dos anéis de crescimento (setas duplas pretas) versus plano de aplicação do carregamento (setas brancas)

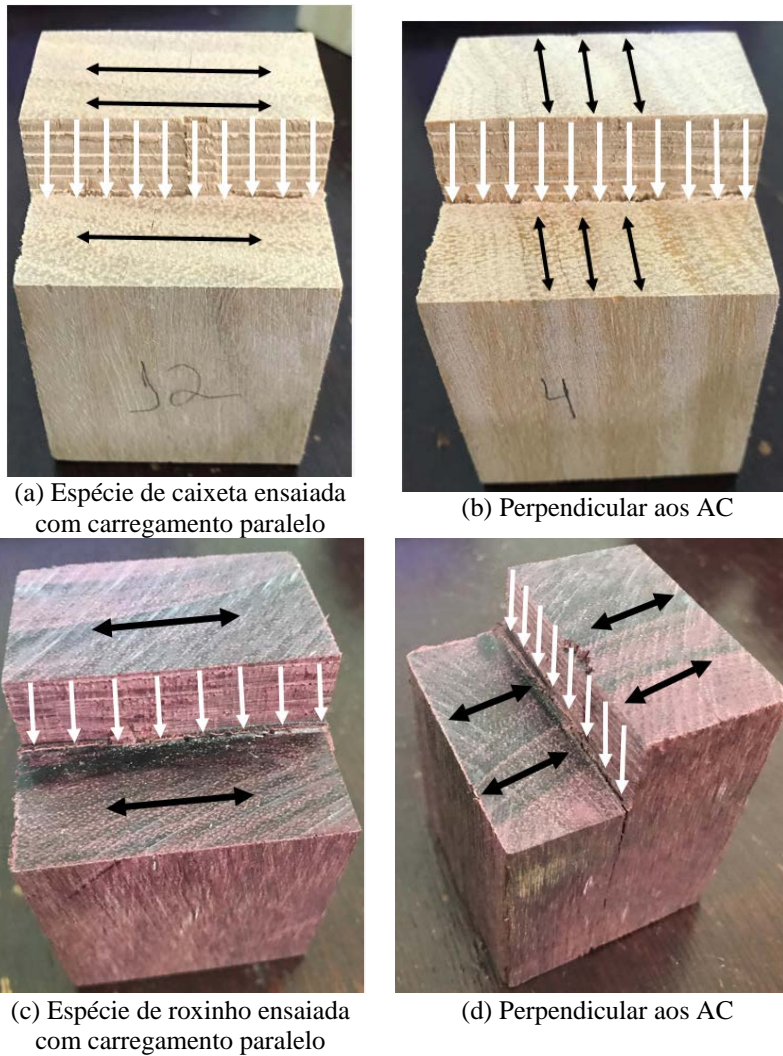
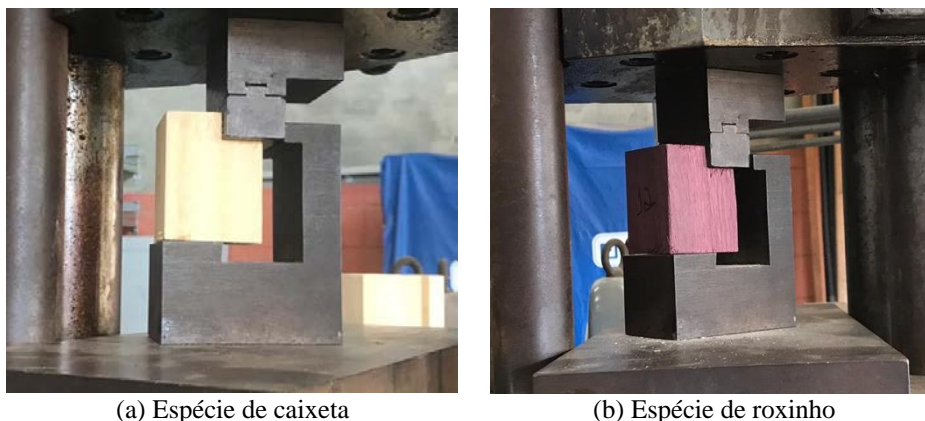


Figura 7 - Corpos de prova em situação de ensaio



(a) Espécie de caixeta

(b) Espécie de roxinho

Análise estatística

A análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de significância, foi utilizada para avaliar a influência da direção (Dir) de aplicação da força (paralela – Par; perpendicular – Per) em relação aos anéis de crescimento no cálculo da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}) das duas espécies de madeira ensaiadas. Pela formulação da ANOVA, P-valor (probabilidade p) menor do que o nível de significância adotado (0,05) implica que as médias dos valores da f_{v0} referentes aos dois níveis (Par, Per) investigados são consideradas estatisticamente diferentes e equivalentes em caso contrário (P-valor $\geq 0,05$).

Os testes de Anderson Darling (AD) e o de comparações múltiplas (CM) foram utilizados para verificar as premissas de normalidade e de igualdade de variâncias respectivamente, com ambos avaliados também ao nível de 5% de significância. Logo, pela formulação dos referidos testes, P-valor maior ou igual ao nível de significância implica o atendimento das premissas da ANOVA e o não atendimento em caso contrário.

Com o intuito de agrupar os valores médios das espécies para os resultados de cisalhamento, o teste de Tukey a um nível de 5% de significância foi realizado. Valores acompanhados da mesma letra são tomados como estatisticamente equivalentes, e de letras diferentes, o contrário.

Resultados e discussões

A respeito da análise estatística para testar a equivalência entre valores da resistência média ao cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v0,m}$) de acordo com a direção (paralela – Par; perpendicular – Per) em relação aos anéis de crescimento da madeira, a Tabela 2 apresenta os P-valores da ANOVA e dos respectivos testes de validação (normalidade [AD] e igualdade de variâncias [CM]).

Com relação à Tabela 2, os P-valores dos testes de normalidade e de igualdade de variâncias foram ambos superiores ao nível de significância (0,05) para as duas espécies de madeira avaliadas, validando o modelo da ANOVA. A respeito dos resultados da ANOVA, foi apontada a equivalência entre valores de resistência obtidos quando se variou o plano de carregamento em relação aos anéis de crescimento (AC) [P-valor $> 0,05$] das duas espécies. Esses resultados corroboram o que foi divulgado por Riyanto e Gupta (1996) e Müller *et al.* (2004) para espécies de coníferas e por Longui *et al.* (2017b) para espécies de folhosas. Porém, os resultados aqui encontrados foram na contramão do que Okkonen e River (1988), Lang *et al.* (2000), Horvath, Niemz e Molnar (2008), Hass *et al.* (2009), Sonderegger *et al.* (2013), Nadir, Nagarajan e Midhun (2014) e Ozyhar *et al.* (2016) determinaram para espécies do grupo das folhosas, sendo que esses estudos sempre obtiveram um plano solicitado mais resistente que o outro.

Tabela 2 - Resultado da análise de variância e dos testes de validação da ANOVA

Espécies	P-valor		
	ANOVA	AD	CM
Caixeta	0,111	0,659	0,749
Roxinho	0,638	0,874	0,324

A Tabela 3 apresenta os valores médios (\bar{x}) e o CV da resistência ao cisalhamento paralelo (f_{v0}) por espécie de madeira e por direção de aplicação da força em relação aos anéis e crescimento. Destaca-se que essa tabela apresenta o resultado do teste de Tukey, que foi realizado com a análise de variância (ANOVA). Para os resultados do teste de Tukey, mesma letra indicou equivalência entre médias, e letras diferentes mostram a não equivalência entre os resultados das espécies e direções investigadas.

A Tabela 4 traz a média e o valor característico ($f_{v0,k}$) da resistência ao cisalhamento mediante a junção dos resultados amostrais das duas direções analisadas de cada espécie, visto que se obteve igualdade estatística entre essas direções. A Tabela 4 exibe também os valores médios e característicos ($f_{c0,k}$) da resistência na compressão paralela determinados para as duas espécies do trabalho. Ainda na Tabela 4, uma razão entre os valores característicos do cisalhamento e da compressão ($f_{v0,k}/f_{c0,k}$) e outra entre valores característicos e médios ($f_{w0,k}/f_{w0,m}$) para cada tipo de solicitação e para cada espécie foram apresentadas para comparar com os valores recomendados pela norma brasileira para espécies conhecidas do grupo vegetativo das folhosas.

Ao se avaliarem os valores médios da resistência ao cisalhamento paralelo [f_{v0}] (Tabela 3) encontrados para a espécie de caixeta nas direções Par ($f_{v0,par} = 9,50$ MPa) e Per ($f_{v0,per} = 10,38$ MPa), pode-se dizer que os valores não variaram de forma substancial de acordo com a direção empregada, conforme determinado pela ANOVA. Os valores encontrados nesta pesquisa foram maiores que o encontrado por Araújo (2007) [6,96 MPa], Duarte (2017) [6 MPa] e IPT (INSTITUTO..., 2021a) [7 MPa]. Porém, com relação ao valor característico [$f_{v0,k}$] (Tabela 4) considerando as duas direções de análise ($f_{v0,k} = 8,60$ MPa), não foi encontrada qualquer pesquisa que pudesse servir de parâmetro.

Na sequência, com relação aos valores médios de resistência ao cisalhamento paralelo (Tabela 3) encontrados para a espécie de roxinho nas direções Par ($f_{v0,par} = 18,17$ MPa) e Per ($f_{v0,per} = 17,57$ MPa), constata-se que esses valores foram praticamente iguais entre si, além de serem próximos ao obtido por Araújo (2007) [18,14 MPa] e Duarte (2017) [20,00 MPa], porém mais distantes do encontrado pelo IPT (2021b) [14,90 MPa], que ensaiou essa espécie em condição de madeira verde, o que justifica o valor abaixo dos outros. Já acerca do valor característico (Tabela 4) determinado considerando as duas direções de análise ($f_{v0,k} = 15,80$ MPa), não foi encontrado qualquer resultado na literatura para comparar com o determinado.

A respeito da variação da resistência ao cisalhamento de acordo com a orientação do plano de carregamento, percebe-se que, apesar de não haver diferença estatística entre as direções analisadas e de a diferença encontrada entre valores ter sido muito pequena, a resistência com o plano de carregamento LT (direção paralela – Par) foi maior no caso da espécie de roxinho, enquanto no caso da espécie de caixeta o plano mais resistente foi o LR (direção perpendicular – Per). Logo, pode-se notar na Tabela 1 que a quantidade de parênquima axial é bem maior para a caixeta do que para o roxinho, levando a primeira espécie a um possível “enfraquecimento” na direção tangencial (Par).

Tabela 3 - Estatística dos resultados da resistência ao cisalhamento paralelo (f_{v0}) de cada espécie e direção de análise

Espécie	Direção paralela ($f_{v0,par}$)		Direção perpendicular ($f_{v0,per}$)	
	\bar{x} (MPa)	CV (%)	\bar{x} (MPa)	CV (%)
Roxinho	18,17 (A)	15,02	17,57 (A)	7,23
Caixeta	9,50 (B)	9,74	10,38 (B)	7,79

Tabela 4 - Estatística dos resultados da resistência na compressão paralela versus resultados do cisalhamento e razões obtidas

Tipo de solicitação	Espécie	\bar{x} (MPa)	CV (%)	$f_{w0,k}$ (MPa)	$f_{w0,k}/f_{w0,m}$	$f_{v0,k}/f_{c0,k}$
Cisalhamento Compressão	Caixeta	9,94	9,71	8,60	0,87	0,38
		32,00	6,00	22,70	0,71	
Cisalhamento Compressão	Roxinho	17,87	11,87	15,80	0,88	0,23
		89,90	12,60	68,30	0,76	

Já no caso da espécie de roxinho, um dos fatores que pode ter influenciado o resultado final é a presença dos raios, que reforçou a direção tangencial por atuarem como se fossem parafusos, restringindo as camadas de crescimento de deslizarem umas sobre as outras (LONGUI *et al.*, 2017b). Além disso, outra razão que também colaborou para tal resultado é o fato de essa madeira apresentar porosidade difusa (Tabela 1), que garante que não haja diferença significativa de densidade entre suas camadas de crescimento (lenho inicial x lenho tardio), dificultando mais ainda uma falha tangencial, conforme explicado por Horvath, Niemz e Molnar (2008), Hass *et al.* (2009) e Longui *et al.* (2017b), além, é claro, de essa espécie possuir quantidade praticamente insignificante de parênquima axial (tangencialmente aos anéis), de forma a não fragilizar a direção associada.

Com relação aos valores médios da resistência à compressão paralela às fibras, a espécie de caixeta apresentou o valor $f_{c0,m} = 32,00$ MPa [Tabela 4], que é equivalente ao encontrado por Almeida (2017) [30,00 MPa], Araújo (2007) [33,05 MPa], Duarte (2017) [31,00 MPa] e IPT (INSTITUTO..., 2021a) [33,00 MPa]. Já no trabalho de Souza, Bufalino e Gomes (2020), a espécie de caixeta foi classificada na classe de resistência D20, em concordância com o valor característico da resistência à compressão paralela obtido ($f_{c0,k} = 22,70$ MPa).

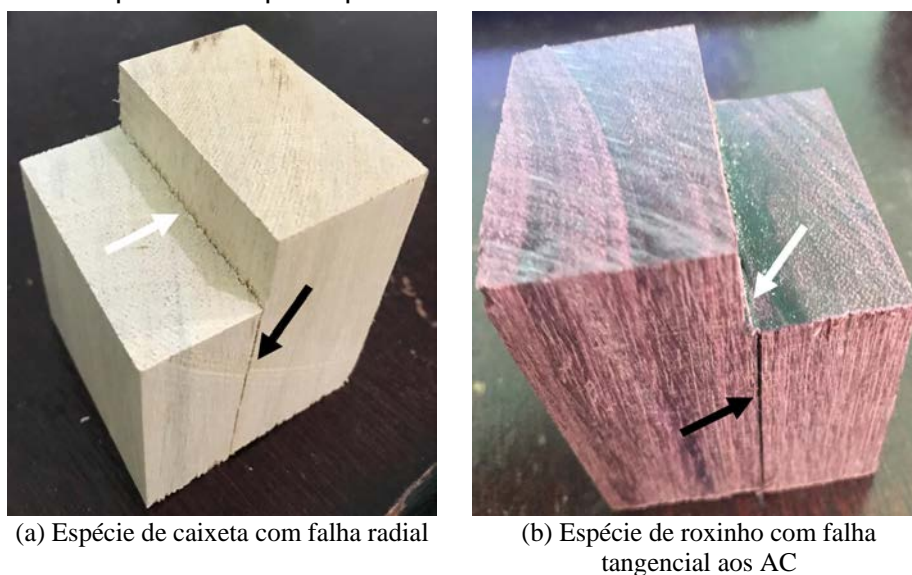
O valor médio da resistência na compressão paralela aqui determinado para a espécie de roxinho ($f_{c0,m} = 89,90$ MPa) [Tabela 4] foi semelhante aos disponibilizados por Almeida (2017) [86 MPa] para a espécie *Peltogyne* sp., Araújo (2007) [90,52 MPa] para a espécie de *Peltogyne paniculata* e IPT (2021b) [84,1 MPa para um teor de umidade de 15%] para a espécie de *Peltogyne confertiflora*, apesar de se distinguir do resultado apresentado por Duarte (2017) [72 MPa] para a espécie *Peltogyne recifenses*. Ainda no trabalho de Almeida (2017), a espécie de roxinho foi classificada na classe de resistência D60. Tal enquadramento está coerente com o valor característico da resistência à compressão paralela aqui determinado ($f_{c0,k} = 68,30$ MPa), indicando mais uma vez que os valores obtidos neste trabalho se aproximam de outras pesquisas.

Chama-se a atenção para a relação encontrada na última coluna da Tabela 4, onde $f_{v0,k}/f_{c0,k}$ foi igual a 0,23 e 0,38 para as espécies de roxinho e caixeta respectivamente. Percebe-se que esses valores são bem maiores que o apresentado pela NBR 7190-1:2022 para essa mesma relação. Por meio da calibração de tal norma, tem-se que $f_{v0,k}$ seja igual a 12% da $f_{c0,k}$ ($f_{v0,k} = 0,12 \cdot f_{c0,k}$) para todas espécies usuais do grupo das folhosas. Assim, nota-se que o valor da norma brasileira é conservador para as espécies investigadas, principalmente para a espécie de caixeta, que apresentou valor característico da resistência ao cisalhamento paralelo como sendo equivalente a 38% de $f_{c0,k}$. Portanto, o resultado dessa relação entre as espécies traz maior eficiência/economia no projeto de estruturas com relação ao dimensionamento de ligações e vigas de madeiras sujeitas ao cisalhamento, quando essas espécies forem selecionadas.

Além de tudo, com relação aos CV das Tabelas 3 e 4, o valor mais alto encontrado nos testes da resistência ao cisalhamento foi determinado na direção paralela aos anéis de crescimento da espécie de roxinho, que apresentou um CV igual a 15,02%. Já o maior CV encontrado nos ensaios da resistência na compressão foi igual a 12,60% também para a espécie de roxinho. Assim sendo, esses valores são menores que o máximo recomendado de 28% e de 18% pela NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) para esforços tangenciais e normais respectivamente. Portanto, apesar de os CV serem aceitáveis, a relação $f_{v0,k}/f_{c0,k}$ variou substancialmente do recomendado pela norma brasileira. Logo, com o intuito de se entender esse resultado mais a fundo, procurou-se avaliar a relação entre valores característicos e médios (Equação 1) utilizada na calibração e formulação que resulta na estimativa final de $f_{v0,k} = 0,12 \cdot f_{c0,k}$.

Na Tabela 4 pode ser constatado que a razão entre o valor característico e o médio no cisalhamento ($f_{v0,k}/f_{v0,m}$) das espécies de caixeta e roxinho resultou em valores de 0,87 e 0,88 respectivamente. Esses valores, quando confrontados com a estimativa da NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) [$f_{v0,k} = 0,54 \cdot f_{v0,m}$], indicam que esta leva a valores altamente conservadores. Já a razão entre valor característico e médio na compressão ($f_{c0,k}/f_{c0,m}$) resultou em 0,71 e 0,76 para as espécies de caixeta e roxinho respectivamente. Assim, ao se compararem esses valores à estimativa da norma brasileira ($f_{c0,k} = 0,70 \cdot f_{c0,m}$), a NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) demonstrou boa aproximação. Portanto, para essas espécies, a calibração realizada pela norma brasileira para a obtenção de $f_{v0,k} = 0,12 \cdot f_{c0,k}$ não é alcançada justamente por conta do baixo valor (0,54) considerado para a $f_{v0,k}$ estimada através de sua média. Além do mais, esses resultados reafirmam que, para espécies pouco usuais, é importante que a aceitação da madeira para execução de estruturas se dê apenas quando ela tiver pelo menos sua caracterização mínima de resistências realizada, de acordo com o estabelecido pela NBR 7190-3 (ABNT, 2022b), de forma a se atingirem tanto maior segurança quanto maior economia do dimensionamento de estruturas.

Figura 8 - Modo de ruptura dos corpos de prova



(a) Espécie de caixeta com falha radial

(b) Espécie de roxinho com falha tangencial aos AC

A respeito do modo de falha dos corpos de prova, a Figura 8 traz um corpo de prova de cada espécie para ilustrar os modos de ruptura encontrados nos ensaios. O CP de caixeta (Figura 8a) rompeu devido a um plano de carga perpendicular aos anéis de crescimento, enquanto o de roxinho (Figura 8b) foi solicitado tangencialmente aos seus AC. Assim, pode-se observar em mais detalhes na Figura 8 que tanto para a espécie de caixeta quanto para a de roxinho a falha acompanhou a orientação da grã (indicada pela seta preta), que coincide com a direção longitudinal de aplicação da força. Esse modo de propagação da falha é coerente tanto por ser a direção de aplicação de carga quanto pelo fato de as espécies apresentarem grã direita de acordo com IPT (INSTITUTO..., 2021a, 2021b) e Santini Junior, Florsheim e Tommasiello Filho (2021).

Por outro lado, no que diz respeito à direção da falha na seção transversal (indicada pela seta branca), a falha sempre acompanhou a direção do carregamento. Logo, quando o carregamento foi aplicado na direção radial da seção transversal (Figura 8a), a ruptura sempre aconteceu nessa direção, com as camadas de crescimento sendo partidas/cisalhadas ao meio. Similarmente, quando o carregamento foi aplicado tangencialmente aos anéis de crescimento (Figura 8b), a falha se propagou nesta direção (deslizamento das fibras). Portanto, o modo de ruptura variou de acordo com a orientação do carregamento na seção transversal dos CP, e não de acordo com a espécie.

Por fim, destaca-se mais uma vez a importância de os ensaios serem realizados em todas as espécies comerciais que sejam de valor para o uso estrutural, de forma que se consiga obter dados individualizados, visto que na literatura os resultados não são tão consistentes. Nem quando se leva em consideração todos os trabalhos desenvolvidos, não há muitas espécies de folhosas estudadas. Além de tudo isso, existem também alguns casos nos quais espécies do mesmo gênero demonstram comportamento inverso quando comparadas, como em Sonderegger *et al.* (2013) [*Acer pseudoplatanus* L.] versus Okkonen e River (1988) [*Acer saccharum*], o que reforça ainda mais a necessidade de investigações por espécie, como a realizada nesta pesquisa.

Conclusão/considerações finais

Por meio do que foi estudado nesta pesquisa, pode-se chegar às conclusões a seguir.

- (a) apesar da anatomia complexa e heterogênea que as madeiras de caixeta e roxinho apresentam, não foi encontrada diferença estatística nos valores médios determinados para a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras quando se variou o plano de carregamento do plano longitudinal tangencial (LT – Par) para o longitudinal radial (LR – Per), ou seja, quando a força foi aplicada tangencialmente versus perpendicularmente aos anéis de crescimento. Essa informação é importante para um projeto de estruturas de madeiras mais seguro e eficiente;
- (b) os valores médios da resistência ao cisalhamento e da compressão paralela às fibras das duas espécies foram condizentes com os determinados por outras pesquisas, assim como os valores característicos da compressão. Em contrapartida, não foram encontrados valores característicos da resistência ao

cisalhamento para que os aqui determinados fossem comparados, evidenciando, assim, outra contribuição deste trabalho;

- (c) apesar de não haver diferença estatística entre as direções analisadas e de a diferença encontrada entre valores ter sido muito pequena, a resistência com o plano de carregamento LT (direção paralela – Par) foi maior no caso da espécie de roxinho, enquanto no caso da espécie de caixeta o plano mais resistente foi o LR (direção perpendicular – Per). Logo, pode-se notar que a quantidade de parênquima axial, que são células não lignificadas, é bem maior para a caixeta do que para o roxinho, levando essa primeira espécie a um possível “enfraquecimento” na direção tangencial (Par);
- (d) para a espécie de roxinho, um dos fatores que pode ter atuado de forma a influenciar o resultado final é a presença dos raios que reforçam a direção tangencial, por atuarem como se fossem parafusos que restringem os anéis de deslizarem uns sobre os outros. Além disso, outra razão que também colaborou para tal resultado é o fato de essa madeira apresentar porosidade difusa, o que garante que não haja uma diferença significativa de densidade entre suas camadas de crescimento (lenho inicial x lenho tardio), dificultando mais ainda uma falha tangencial. Nesse mesmo sentido, essa espécie apresentou quantidade praticamente insignificante de parênquima axial (tangencialmente aos anéis), novamente de forma a não enfraquecer o plano LT (longitudinal tangencial);
- (e) os coeficientes de variação encontrados tanto para a resistência à compressão quanto para a resistência ao cisalhamento foram menores que os máximos valores respectivamente de 18% e de 28% admitidos na calibração da norma brasileira NBR 7190-3 (ABNT, 2022b) para se atingir $f_{v0,k} = 0,12.f_{c0,k}$. Porém, a razão entre o valor característico ($f_{v0,k}$) e o valor médio amostral da resistência no cisalhamento ($f_{v0,m}$) resultou em $f_{v0,k} = 0,87.f_{v0,m}$ e $f_{v0,k} = 0,88.f_{v0,m}$ para a caixeta e o roxinho respectivamente. Tais valores demonstram que a estimativa da norma NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) de $f_{v0,k} = 0,54.f_{v0,m}$, que é utilizada na formulação que resulta em $f_{v0,k} = 0,12.f_{c0,k}$, é bastante conservadora para as duas espécies estudadas. Diferentemente, a estimativa da norma de $f_{c0,k} = 0,70.f_{c0,m}$, que também é utilizada para se obter $f_{v0,k} = 0,12.f_{c0,k}$, se aproximou bastante dos valores aqui determinados de $f_{c0,k} = 0,71.f_{c0,m}$ e $f_{c0,k} = 0,76.f_{c0,m}$ para as espécies de caixeta e roxinho respectivamente;
- (f) a relação de $f_{v0,k}/f_{c0,k}$ obtida foi igual a 0,23 e 0,38 para as espécies de roxinho e caixeta respectivamente. Justamente pelo não ajuste da razão entre o valor médio e o característico no cisalhamento de cada espécie ao valor da norma ($f_{v0,k} = 0,54.f_{v0,m}$), esses valores da relação de $f_{v0,k}/f_{c0,k}$ são bem maiores que o encontrado pela NBR 7190-1 (ABNT, 2022a), que permite, através de sua calibração, que $f_{v0,k}$ seja considerado igual a 12% da $f_{c0,k}$ ($f_{v0,k} = 0,12.f_{c0,k}$) para todas as espécies usuais do grupo das folhosas. Nota-se que o valor da norma brasileira é conservador para as espécies deste trabalho, principalmente no caso da espécie de caixeta. Além disso, esses resultados indicam a importância da caracterização experimental da madeira serrada de espécies folhosas para uso na obra, especialmente daquelas pouco conhecidas, dada a variabilidade do material e os resultados aqui apresentados;
- (g) em resumo, a ANOVA realizada demonstra que as duas espécies podem ser ensaiadas para a obtenção de sua resistência ao cisalhamento paralelo sem qualquer risco de minoração quando a carga é aplicada em planos diferentes. Além disso, as relações encontradas neste estudo evidenciam a impossibilidade da estimativa de resistências de espécies pouco conhecidas através de seu valor característico de resistência na compressão paralela. Assim, a combinação desses resultados torna o cálculo e o dimensionamento de peças solicitadas ao cisalhamento mais seguros e econômicos, especialmente para as espécies de caixeta e roxinho;
- (h) o modo de ruptura das peças cisalhadas variou de acordo com o plano de carga, e não de acordo com a espécie ensaiada. Logo, quando a carga foi aplicada no plano longitudinal tangencial, a falha se propagou nessa direção. Da mesma forma, quando a carga foi aplicada no plano longitudinal radial, a ruptura se deu neste mesmo plano. Assim, fica evidente também que a falha sempre acompanhou a direção longitudinal dos espécimes; e
- (i) para os próximos estudos que envolvam espécies nativas do Brasil, recomenda-se a realização de uma análise ainda mais aprofunda da microestrutura das madeiras folhosas, considerando-se fatores como a parcela de lenho primaveril por lenho tardio, número de anéis por polegada ou centímetro, e curvatura do anel de crescimento com relação à distância da medula, principalmente quando as madeiras apresentarem diferença estatística no valor da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras de uma direção de aplicação de carregamento para outra, com relação aos anéis de crescimento.

Referências

- AICHER, S.; AHMAD, Z.; HIRSCH, M. Bondline shear strength and wood failure of European and tropical hardwood glulams. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 76, p. 1205-1222, 2018.
- AJUZIUGU, G. C. *et al.* Biomechanics, an aspect of the relationships between wood anatomical parameters and mechanical strength in ten Nigerian timber species. **International Journal of Scientific and Engineering Research**, v. 5, n. 2, p. 628-645, 2014.
- AKTER, S. T.; SERRANO, E.; BADER, T. K. Numerical modelling of wood under combined loading of compression perpendicular to the grain and rolling shear. **Engineering Structures**, v. 244, n. 112800, 2021.
- ALMEIDA, D. H. **Estimativa de propriedades de resistência e de rigidez de madeiras tropicais brasileiras pela técnica de colorimetria**. São Carlos, 2017. 98 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 143-09**: standard test methods for small clear specimens of timber. Philadelphia, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 143-83**: standard methods of testing small clear specimens of timber. v. 04.09. Philadelphia, 1952.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 905-49**: standard test methods for strength properties of adhesive bonds in shear by compression bonding. v. 15.06. Philadelphia, 1986.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5379/D 5379M-98**: standard test method for shear properties of composite materials by the v-notched beam method. Philadelphia, 1999.
- ARAÚJO, H. J. B. Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras. **Floresta**, v. 37, n. 3, p. 399-416, 2007.
- ASHKENAZI, E. K. **Anisotropy of wood and wood-base materials**. Moscow: Izdatelstvo Lesnaja Promuslennosty, 1976.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-1**: projeto de estruturas de madeira: parte 1: critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro, 2022a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-3**: projeto de estruturas de madeira: parte 3: métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro, 2022b.
- BENDTSEN, B. A.; PORTER, S. Comparison of results from standard 2-inch with 1-1/2-inch shear block tests. **Forest Products Journal**, v. 28, n. 7, p. 54-56, 1978.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982.
- BRÖKER, F. W.; MEIERHOFER, U. A.; RADOVIC, B. Influence of specimen dimensions on the shear strength of cubic spruce blocks. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 45, p. 445-448, 1987.
- CARRASCO, E. V. M.; MANTILLA, J. N. R. Influência da inclinação das fibras da madeira na sua resistência ao cisalhamento. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 535-543, 2016.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 52187**: testing of wood: determination of ultimate shearing stress parallel to grain. Berlin, 1979.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **EN 302-1 DE**: adhesives for load-bearing timber structures-Test methods-Part 1: Determination of bond strength in longitudinal tensile shear strength. Berlin, 2004.
- DUARTE, B. B. **Influência de componentes químicos em propriedades mecânicas da madeira**. São Carlos, 2017. 119 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.
- GUPTA, R.; SINHA, A. Effect of grain angle on shear strength of Douglas-fir wood. **Holzforschung**, v. 66, n. 5, p. 655-658, 2012.

- HASS, P. *et al.* Influence of growth ring angle, adhesive system and viscosity on the shear strength of adhesive bonds. **Wood Material Science & Engineering**, v. 4, p. 140-146, 2009.
- HORVATH, N.; NIEMZ, P.; MOLNAR, S. Examinations to the influence of wood moisture on chosen wood properties of spruce, oak and beech. **Holztechnologie**, v. 49, n. 3, p. 10-15, 2008.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Informações sobre madeiras: caixeta**. Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/43-caixeta.htm. Acesso em: 14 dez. 2021a.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Informações sobre madeiras: roxinho**. Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/49-roxinho.htm. Acesso em: 14 dez. 2021b.
- LABONNOTE, N.; MALO, K. A. Effect of annual ring patterns on Norway spruce resulting material properties. In: WORLD CONFERENCE OF TIMBER ENGINEERING, 11., Riva del Garda, 2010. **Proceedings [...]** New York: Curran Associates, 2012.
- LANG, E. M. *et al.* Orthotropic strength and elasticity of hardwoods in relation to composite manufacture. Part I. Orthotropy of shear strength. **Wood and Fiber Science**, v. 32, n. 4, p. 502-519, 2000.
- LI, M. *et al.* Effect of microstructures on the shear strength of *Larix kaempferi*. **Forests**, v. 12, n. 6, p. 830, 2021.
- LIU, J. Y. *et al.* An improved shear test fixture using the Iosipescu specimen. In: ASME JOINT APPLIED MECHANICS AND MATERIALS DIVISION MEETING, BLACKSBURG, Virginia, 1999. **Proceedings [...]** Virginia, 1999.
- LIU, J. Y.; FLOETER, L. H. Shear strength in principal plane of wood. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 110, n. 6, p. 930-936, 1984.
- LOGSDON, N. B.; FINGER, Z.; JESUS, J. M. H. Influência do ângulo entre o esforço aplicado e a direção das fibras da madeira sobre a resistência ao cisalhamento. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 4, p. 969-978, 2014.
- LONGUI, E. L. *et al.* Relationships among wood anatomy, hydraulic conductivity, density and shear parallel to the grain in the wood of 24-year-old *Handroanthus vellosi* (Bignoniaceae). **Rodriguésia**, v. 68, p. 1217-1224, 2017a.
- LONGUI, E. L. *et al.* Shear strength parallel to grain with distinct ray orientation on four Brazilian wood species. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 75, p. 663-665, 2017b.
- LUOSTARINEN, K.; HERÄJÄRVI, H. Relationship between anatomy and shear strength in wood of *Larix sibirica*. **Holzforschung**, v. 72, p. 1001-1006, 2018.
- MASCIA, N. T.; NICOLAS, E. A. Determination of Poisson's ratios in relation to fiber angle of a tropical wood species. **Constr Build Mater**, v. 41, p. 691-696, 2013.
- MÜLLER, U. *et al.* Longitudinal shear properties of European larch wood related to cell wall structure. **Wood and Fiber Science**, v. 36, p. 143-151, 2004.
- NADIR, Y.; NAGARAJAN, P.; MIDHUN, A. J. Measuring elastic constants of *Hevea brasiliensis* using compression and Iosipescu shear test. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 72, p. 749-758, 2014.
- NIEMZ, P. *et al.* Physical and mechanical properties of common ash (*Fraxinus excelsior* L.). **Wood Research**, v. 59, n. 4, p. 671-682, 2014.
- OKKONEN, E. A.; RIVER, B. H. Factors affecting the strength of block-shear specimens. **Forest Products Journal**, v. 39, n. 1, p. 43-50, 1988.
- OZYHAR, T. *et al.* **Wood Material Science & Engineering**, v. 11, n. 1, p. 36-45, 2016.
- RIYANTO, D. S.; GUPTA, R. Effect of ring angle on shear strength parallel to the grain of wood. **Forest Products Journal**, v. 46, n. 7/8, p. 87-92, 1996.
- SANTINI JUNIOR, L.; FLORSHEIM, S. M. B.; TOMMASIELLO FILHO, M. **Anatomia e identificação da madeira de 90 espécies tropicais comercializadas em São Paulo**. Ponta Grossa: Atena, 2021. Disponível em: <https://sistema.atenaeditora.com.br/index.php/admin/api/artigoPDF/43453>. Acesso em: 6 dez. 2021.
- SONDEREGGER, W. *et al.* Investigations on the physical and mechanical behaviour of sycamore maple (*Acer pseudoplatanus* L.). **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 71, p. 91-99, 2013.

SOUZA, M. M.; BUFALINO, L.; GOMES, L. G. Caracterização madeira de marupá (*Simarouba Amara* Aubl, *Simaroubaceae*) visando utilização na indústria moveleira. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 12, p. 98163-98185, 2020.

SZALAI, J. **Anisotropic strength and elasticity of wood and wood based composites**. Sopron: [s.n.], 1994.

SZALAI, J. Indirect determination of shearing strength of wood using the anisotropic strength theory (in German). **Holz RohWerkst**, v. 50, p. 233-238, 1992.

TOONG, W. *et al.* The prediction of wood properties from anatomical characteristics: the case of common commercial Malaysian timbers. **BioResources**, v. 9, n. 3, p. 5184-5197, 2014.

ZAQUE, L. A. M.; MELO, R. R. **Caracterização macroscópica de madeiras da Amazônia**. Pará de Minas: Virtual Books, 2019.

Edson Fernando Castanheira Rodrigues

Conceitualização, Metodologia, Análise de dados, Pesquisa, Curadoria de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição, Design da apresentação de dados, Recebimento de financiamento.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal de São Carlos | Rod. Washington Luís, Km 235, s/n, Jardim Guanabara | São Carlos - SP - Brasil | CEP 13565-905 | Tel.: (16) 99152-7447 | E-mail: edson.engcivil.projetos@gmail.com

Victor Almeida De Araujo

Conceitualização, Validação de dados e experimentos, Redação - revisão e edição, Supervisão.

Instituto de Ciências e Engenharia | Universidade Estadual Paulista | Rua Geraldo Alckmin, 519, Vila Nossa Sra. de Fatima | Itapeva - SP - Brasil | CEP 18409-010 | Tel.: (15) 3524-9100 | E-mail: engim.victor@gmail.com

Felipe Nascimento Arroyo

Pesquisa, Análise de dados, validação, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal de São Carlos | Tel.: (17) 99284-2500 | E-mail: lipe.arroyo@gmail.com

João Paulo Boff Almeida

Pesquisa, Análise de dados, validação, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal de São Carlos | Tel.: (16) 99645-4544 | E-mail: boff.joaopaulo@gmail.com

André Luis Christoforo

Conceitualização, Metodologia, Redação - revisão e edição, Supervisão, Administração do projeto, Disponibilização de ferramentas.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal de São Carlos | Tel.: (16) 3306-6828 | E-mail: alchristoforo@ufscar.br

Francisco Antonio Rocco Lahr

Conceitualização, Metodologia, Redação - revisão e edição, Supervisão, Disponibilização de ferramentas.

Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos | Universidade de São Paulo | Av. Trabalhador São carlense, 400, Centro | São Carlos - SP - Brasil | CEP 13566-590 | Tel.: (16) 98182-6224 | E-mail: frocco@sc.usp.br

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.