



**FERNANDO ALBERTO JIMENEZ DUARTE**

**RELAÇÕES ENTRE ATRIBUTOS DE QUALIDADE FÍSICO-  
ULTRAESTRUTURAIS DA MADEIRA DE *Tectona grandis* E  
SUAS PROPRIEDADES MECÂNICAS**

**LAVRAS – MG**

**2024**

**FERNANDO ALBERTO JIMENEZ DUARTE**

**RELAÇÕES ENTRE ATRIBUTOS DE QUALIDADE FÍSICO-  
ULTRAESTRUTURAIS DA MADEIRA DE *Tectona grandis* E SUAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração de Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. José Tarcísio Lima

Orientador

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva

Coorientador

**LAVRAS – MG**

**2024**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Duarte, Fernando Alberto Jimenez.

Relações entre atributos de qualidade físico-ultraestruturais da  
madeira de *Tectona grandis* e suas propriedades mecânicas /  
Fernando Alberto Jimenez Duarte. - 2022.

70 p. : il.

Orientador(a): José Tarcísio Lima.

Coorientador(a): José Reinaldo Moreira da Silva.

Dissertação (Mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Rigidez. 2. Resistência. 3. Vibração transversal. 4. *Slip  
plane*. 5. Parede celular lenhosa. 6. Ângulo microfibrilar. I. Lima,  
José Tarcísio. II. Silva, José Reinaldo Moreira da. III. Título.

**FERNANDO ALBERTO JIMENEZ DUARTE**

**RELAÇÕES ENTRE ATRIBUTOS DE QUALIDADE FÍSICO-  
ULTRAESTRUTURAIS DA MADEIRA DE *Tectona grandis* E SUAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS**

**RELATIONSHIPS BETWEEN THE PHYSICAL-ULTRASTRUCTURAL QUALITY  
ATTRIBUTES OF *Tectona grandis* WOOD AND ITS MECHANICAL PROPERTIES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração de Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

**APROVADA em 25 de agosto de 2022**

Dr. José Tarcísio Lima	UFLA
Dr. José Reinaldo Moreira da Silva	UFLA
Dr. Jordão Cabral Moulin	UFES
Dr. Bruno Charles Dias Soares	Colégio Tiradentes da Polícia Militar de Minas Gerais

Prof. Dr. José Tarcísio Lima

Orientador

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva

Coorientador

**LAVRAS – MG**

**2024**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela vida, saúde, força, iluminação e paciência brindada para iniciar, cursar e concluir mais um ciclo importante da minha vida.

Ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira (PPGCTM) da Universidade Federal de Lavras – UFLA, pela grande oportunidade que me foi fornecida para iniciar e concluir este trabalho.

Ao Programa Presidencial de Bercas Honduras 20/20 da Republica de Honduras pela concessão da bolsa de estudo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão de bolsa de estudo nos últimos meses para concluir as metas deste trabalho.

À Celulose Nipo-Brasileira S.A. – CENIBRA, pela doação das madeiras e apoio para coleta do material.

À minha mãe Ana Elizabeth Duarte Rivera, motor da minha vida, por sempre estar à minha mão, desde meu país, e mais firme durante o meu período de estudo no Brasil, assim como ao meu pai Fernando Adalíd Jimenez Cano, pelas palavras de apoio. Também ao meu irmão Fabian Adalíd Jimenez Duarte, ao meu Tio, Santos Felix Jimenez Cano, a quem também considero meu pai e a Daniela Mariano por estar presente nos momentos bons e difíceis.

Ao meu orientador Prof. José Tarcísio Lima, pelo extraordinário apoio, tempo, orientação, compreensão, conselhos, conhecimento transmitido e amizade. Sem ele não poderia ter concluído este importante trabalho.

Ao Prof. Paulo Ricardo Gherardi Hein pela total disposição para me atender antes, durante e depois de ser parte do PPGCTM. Assim como pelo grande exemplo que é como profissional e pesquisador. Assim como ao meu coorientador Prof. Jose Reinaldo Moreira da Silva, pelas minuciosas indicações para o desenvolvimento e melhoria deste trabalho e pelas suas extraordinárias aulas que tive oportunidade cursar.

Ao Prof. Jordão Cabral Moulin pelos conselhos, dicas e motivação para lograr cumprir com algumas metas deste trabalho.

Aos meus colegas de Programa; Jony Sánchez, Emanuella Mesquita, Bruno Soares, Jonas Massuque, Dáfilla Brito e Adriano Mascarenhas pela total disposição a cada vez que precisei de ajuda, em todos os sentidos. Assim como, os demais colegas, pessoal técnico-administrativo do PPGCTM pelo atendimento em diferentes assuntos ligados a este trabalho.

Aos meus ex-professores da Engenharia Florestal do Centro Universitário Regional del Litoral Atlântico, no meu país, por começar minha formação no âmbito florestal.

A todos, muito obrigado! ¡*Muchas gracias!*

## RESUMO

Características físico-ultraestruturais da madeira são normalmente consideradas como atributos com incidência variável ou com efeitos pouco conhecidos nas propriedades mecânicas de várias espécies e de sua aplicação construtiva. Diante dessa situação, torna-se necessário o estudo detalhado das características da madeira e de seus efeitos sobre o seu comportamento mecânico. Assim, objetivou-se investigar o comportamento e as relações da densidade básica (Db), ângulo microfibrilar (AMF) e ocorrência de *slip planes* por milímetro ( $Q_{sp}/mm$ ) na parede celular, com as propriedades mecânicas da madeira de *Tectona grandis*. Para isso, utilizou-se madeira das posições interna intermediária e externa, de toretes da base do caule de cinco árvores de 37 anos de idade, de plantio seminal em espaçamento 3 x 2 m, localizado em Belo Oriente - MG. Dos toretes, foram obtidas pranchas centrais de dez centímetros de espessura, objetivando obtenção de corpos-de-prova (CP) para avaliação da rigidez em compressão paralela às fibras (MOEc), em flexão estática (MOEf) e flexão dinâmica pelo método de vibração transversal (MOEd). Amostras também foram empregadas para determinação da Db, AMF e  $Q_{sp}/mm$ , nos dois últimos, empregando microscopia de luz polarizada em 30 fibras por amostra. Adicionalmente, foi feita a indução de *slip planes* nos CP de flexão estática em condições de extremos fixos, aplicando pré-tensionamentos compressivos axiais, a 30, 55 e 80% da resistência máxima (RC), procurando obtenção de dados controlados para análises de sua associação com a rigidez. Valores médios da Db, AMF,  $Q_{sp}/mm$ , MOEf, MOEd, MOEc e RC, foram, respectivamente, 0,52 g.cm<sup>-3</sup>, 15,13°, 2,23 unidades, 12366 MPa, 14990 MPa, 9436 MPa, e 55,54 MPa. 40,99 e 36,59% da variação do MOEf foi explicada, de forma respectiva e significativa, pela Db e AMF; 17,16 e 10,39% da variação do MOEd pelo AMF e  $Q_{sp}/mm$ ; 24,77 e 31,06% da variação do MOEc pelo AMF e  $Q_{sp}/mm$ ; e 38,28 e 22,10% da variação da RC pela Db e  $Q_{sp}/mm$ . Determinou-se diminuição da Db, do AMF e  $Q_{sp}/mm$  sentido medula casca e, influência significativa das características físico-ultraestruturais na rigidez, em diferentes solicitações. O AMF e a  $Q_{sp}/mm$ , influenciaram, respectivamente, ao MOEc e ao MOEd de forma negativa; a Db e o AMF ao MOEf de forma positiva e negativa. Enquanto que a Db e o  $Q_{sp}/mm$  à RC de forma positiva e negativa. O aumento do pré-tensionamento paralelo às fibras causou incremento na  $Q_{sp}/mm$ ; tanto o pré-tensionamento como os *slip planes* influenciaram negativamente o MOEf e MOEd.

**Palavras-chave:** rigidez; resistência; vibração transversal; *slip plane*; parede celular lenhosa; ângulo microfibrilar.

## ABSTRACT

The physical-ultrastructural characteristics of wood are normally considered attributes with variable incidence or with little-known effects on the mechanical properties of different species and their application in construction. Given this situation, a detailed study of the characteristics of the wood and its effects on its mechanical behavior becomes necessary. Thus, the objective of this study was to investigate the behavior and relationships of basic density (Db), microfibrillar angle (MFA) and occurrence of slip planes per millimeter (Qsp/mm) in the cell wall, with mechanical properties of *Tectona grandis* wood. For this purpose, wood samples from the internal, intermediate and external positions of the base of the stem of five 37-year-old trees from a seed plantation with a spacing of 3 x 2 m located in Belo Oriente - Minas Gerais State, Brazil were used. From the logs, central boards of ten centimeters thick were cut, aiming to obtain test specimens (CP) to evaluate the stiffness in compression parallel to the fibers (MOEc), in static bending (MOEf) and dynamic bending by the transverse vibration method (MOEd). Samples were also used to determine Db, Qsp/mm and AMF, in the last two, using polarized light microscopy on 30 fibers per sample. Additionally, slip planes were induced in static bending CPs under fixed end conditions, applying axial compressive pre-stressing at 30, 55 and 80% of the maximum resistance (RC) in order to obtain controlled data for analysis of their association with the mechanical properties. Average values of Db, AMF, Qsp/mm, MOEf, MOEd, MOEc and RC were, respectively, 0.52 g.cm<sup>-3</sup>, 15.13°, 2.23 QSP/mm, 12366 MPa, 14990 MPa, 9436 MPa, and 55.54 MPa. 40.99 and 36.59% of the variation of MOEf was explained, respectively and significantly, by Db and AMF; 17.16% and 10.39% of the variation of MOEd by AMF and Qsp/mm; 24.77 and 31.06% of the variation of MOEc by AMF and Qsp/mm; and 38.28 and 22.10% of the variation of RC by Db and Qsp/mm. A decrease in Db, AMF and Qsp/mm was determined in the pith-bark direction and a significant influence of the physical-ultrastructural characteristics on stiffness, under different loads. The AMF and Qsp/mm influenced, respectively, the MOEc and MOEd negatively; Db and AMF influenced the MOEf positively and negatively. While Db and Qsp/mm influenced RC positively and negatively. The increase in compressive pre-tensioning parallel to the fibers caused an increase in Qsp/mm; both pre-tensioning and slip planes negatively influenced MOEf and MOEd.

**Keywords:** stiffness; strength; transverse vibration; slip plane; woody cell wall; microfibrillar angle.

## INDICADORES DE IMPACTO

O objetivo deste estudo foi investigar o comportamento e as relações de propriedades físicas, mecânicas e anatômicas da madeira de *Tectona grandis* (Teca) com suas propriedades mecânicas. A Teca é uma espécie florestal amplamente difundida no mundo em função de suas excelentes propriedades físicas, mecânicas, durabilidade entre outras. No Brasil a teca é, principalmente, plantada em regiões de menor desenvolvimento econômico-social. O cultivo de árvores, em geral, contribui com a qualidade ambiental ao estocar carbono em sua madeira advindo da atmosfera. Cada tonelada de madeira seca contém cerca de 500 kg de carbono estocado. Desta forma, o cultivo de teca constitui-se em uma ação mitigadora de impactos no clima. Por ser uma espécie de excelente aplicação ambiental, a industrialização da teca possibilita a produção de diversos itens demandados pela sociedade. Entre esses encontram-se móveis, decks, embarcações e muitos tipos de objetos menores. O incremento da produção e industrialização da teca pode contribuir para a instalação de pequenas e médias empresas, geradoras de riqueza e de postos de trabalho, além de atender demandas, tanto do mercado interno como externo. Do ponto de vista técnico-científico, o melhor conhecimento da madeira de teca, inclusive em seu nível ultramicroscópico, conforme abordado pelo estudo, contribui para a produção de madeira de melhor qualidade e mais ajustada aos processos de produção industrial.

## IMPACT INDICATORS

The objective of this study was to investigate the behavior and relationships between the physical, mechanical and anatomical properties of *Tectona grandis* (Teak) wood and its mechanical properties. Teak is a forest species widely spread throughout the world due to its excellent physical, mechanical and durability properties, among others. In Brazil, teak is mainly planted in regions with lower economic and social development. The cultivation of trees, in general, contributes to environmental quality by accumulating carbon in its wood that comes from the atmosphere. Each ton of dry wood contains approximately 500 kg of stored carbon. Thus, teak cultivation constitutes a mitigating action for climate impacts. Because it is a species with excellent environmental applications, the industrialization of teak enables the production of several items demanded by society. Among these are furniture, decks, boats and many types of smaller objects. Increased teak production and industrialization can contribute to the establishment of small and medium-sized companies, generating jobs and wealth, in addition to meeting demands in both the domestic and foreign markets. From a technical-scientific point of view, better knowledge of teak wood, including at its ultramicroscopic level, as addressed by the study, contributes to the production of better quality wood that is better suited to industrial production processes.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO .....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1</b>	<b>Madeira como material estrutural.....</b>	<b>13</b>
<b>3.2</b>	<b>Estrutura e ultraestrutura da madeira.....</b>	<b>14</b>
<b>3.3</b>	<b>Propriedades mecânicas da madeira e seu vínculo com o uso construtivo .....</b>	<b>15</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Rigidez e resistência.....</b>	<b>15</b>
<b>3.4</b>	<b>Caraterização mecânica da madeira.....</b>	<b>16</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Flexão estática.....</b>	<b>17</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Vibração transversal .....</b>	<b>17</b>
<b>3.5</b>	<b>Densidade e variáveis ultraestruturais vinculadas às propriedades mecânicas .....</b>	<b>19</b>
<b>3.5.1</b>	<b>Densidade .....</b>	<b>19</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Ângulo microfibrilar .....</b>	<b>20</b>
<b>3.5.3</b>	<b><i>Slip plane</i>.....</b>	<b>21</b>
<b>3.6</b>	<b>Microscopia de luz polarizada.....</b>	<b>24</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1</b>	<b>Local de coleta.....</b>	<b>25</b>
<b>4.2</b>	<b>Caraterísticas do material de coleta .....</b>	<b>25</b>
<b>4.3</b>	<b>Amostragem e processamento do material .....</b>	<b>25</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Confecção dos corpos-de-prova.....</b>	<b>26</b>
<b>4.4</b>	<b>Densidade básica.....</b>	<b>27</b>
<b>4.5</b>	<b>Caracterização ultraestrutural.....</b>	<b>27</b>
<b>4.5.1</b>	<b>Ângulo microfibrilar .....</b>	<b>27</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Ocorrência de <i>slip planes</i> .....</b>	<b>28</b>
<b>4.6</b>	<b>Caraterização mecânica.....</b>	<b>29</b>

4.6.1	Ensaio de flexão dinâmica.....	29
4.6.2	Ensaio de compressão paralela às fibras .....	30
4.6.3	Ensaio de flexão estática.....	30
4.7	Indução de <i>slip planes</i> .....	31
4.8	Processo experimental nos corpos-de-prova para indução de <i>slip planes</i> .....	33
4.9	Análise dos dados.....	33
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	34
5.1	Densidade básica.....	34
5.2	Ângulo microfibrilar .....	37
5.3	Quantidade de <i>slip planes</i> por milímetro.....	38
5.4	Rigidez e resistência à compressão paralela às fibras .....	40
5.5	Módulo de elasticidade em flexão estática e dinâmica em flexão.....	42
5.6	Correlações entre atributos da madeira .....	43
5.7	Relações entre propriedades mecânicas e atributos físico-ultraestruturais .....	45
5.7.1	Módulo de elasticidade e resistência em compressão paralela às fibras em função dos atributos físico-ultraestruturais .....	46
5.7.2	Módulo de elasticidade dinâmico em flexão e módulo de elasticidade na flexão estática em função dos atributos físico-ultraestruturais .....	47
5.8	Cargas para induzir a formação de <i>slip planes</i> .....	49
5.8.1	Módulo de elasticidade em flexão estática após pré-tensionamento.....	50
5.8.2	Módulo de elasticidade dinâmico em flexão antes e depois do pré-tensionamento	52
5.8.3	Quantidade de <i>slip planes</i> por milímetro após aplicação das cargas.....	53
6	<b>CONCLUSÕES</b> .....	57
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	58
	<b>ANEXO</b> .....	66

## 1 INTRODUÇÃO

As informações das propriedades mecânicas da madeira são essenciais para várias de suas aplicações e consideram-se de grande relevância na definição de sua qualidade. Além disso, são fundamentais quando a madeira é considerada como material estrutural, uma vez que podem condicionar o cálculo das estruturas.

De forma geral, as propriedades mecânicas da madeira são caracterizadas pela rigidez e resistência ante forças externas destrutivas (Leite *et al.*, 2012), ou às vezes mediante testes não destrutivos. Para aplicações estruturais, a rigidez, dada pelo módulo de elasticidade (MOE), é das propriedades mecânicas de maior interesse (Madsen; Nielsen, 1992). Isso acontece, uma vez que no cálculo estrutural somente considera-se a seção elástica do material. Na engenharia de materiais, é sabido que a aplicação de forças dentro da sua fase elástica permite o retorno do material à sua forma original sem sofrer deformações permanentes após a liberação da carga.

Diferentes fatores podem incidir na variação das propriedades mecânicas da madeira e, entre estas, na sua rigidez, como por exemplo: densidade, temperatura, umidade, anatomia e ultraestrutura (Bodig; Jayne, 1982; Kollmann; Côté Jr, 1968). Por tais razões, estudos sobre os fatores que podem influenciar no comportamento mecânico da madeira são de grande relevância. Entre os fatores intrínsecos da madeira com maior influência nas suas propriedades mecânicas encontram-se a densidade e o ângulo microfibrilar (Zhang, 2003). Além dos anteriores, como variável pouco estudada e desconhecida em espécies de grande relevância econômica os *slip plane* (*sp*).

A densidade e a variável de maior importância da madeira, de acordo com alguns pesquisadores (Panshin; De Zeeuw, 1980), o fato deve-se a sua boa correlação com as demais propriedades da madeira e forte influência nos diversos processos de produção em que participa. Porém, a razão do seu estreito vínculo com as características anatômicas (Zhang, 2003), não deve ser usada como único parâmetro de qualidade, já que dependendo do seu uso pode não ser conclusiva (Flóres, 2012). Em geral, a relação da densidade com propriedades como a rigidez e resistência é positiva. Entretanto, podendo ser modificada em função das variações que a madeira sofre no sentido medula-casca no caule das árvores (Conw; Ball, 2001; Melo *et al.*, 2010).

O ângulo microfibrilar ou ângulo das microfibrilas (AMF) da parede celular das fibras (Zhang, 2003), referente ao ângulo entre o eixo longitudinal da mesma e a orientação das microfibrilas de celulose da camada S2, es por sua vez outro fator de vínculo estreito com as

propriedades mecânicas da madeira, sobre tudo com a sua rigidez (Donaldson, 1996) e resistência (Walker; Butterfield, 1996). Junto com a densidade constituem os principais indicadores de qualidade desse material e em combinação, significativa forma de explicar a medida de rigidez da madeira (Donaldson, 1996; Meylan; Probine, 1969). De maneira geral, grandes ângulos microfibrilares exercem influência negativa na rigidez assim como outras das propriedades da madeira (Barnett; Bonham, 2004). Na literatura o AMF encontra-se como característica ultraestrutural amplamente estudada; porém, com poucas informações sobre a magnitude da sua relação com a rigidez da madeira de espécies com elevado valor comercial.

Outra característica ultraestrutural vinculada a alterar as propriedades mecânicas da madeira, entre as quais encontra a rigidez com poucas informações, são os *slip plane* (Lima, 1999) ou *dislocations* (Nyholm *et al.*, 2001). Estes são falhas ou deformações que se desenvolvem na parede celular das fibras da madeira devido a tensões de compressão axial (Bienfait, 1926), que podem acontecer abaixo do limite elástico (Dinwoodie, 1968). Embora se saiba que os *slip planes* são capazes de afetar as propriedades mecânicas da madeira (Lima, 1999), são escassas as pesquisas relacionadas ao assunto, de igual forma, as relacionadas a caracterizar seu comportamento ao longo da seção transversal do tronco das arvores. Além disso, dado que a ocorrência dos *slip planes* na madeira, tanto em quantidade, como na posição do troco onde se encontram, pode contribuir para explicar o mecanismo de ruptura da madeira sob diferentes esforços considera-se necessário o seu estudo detalhado.

## 2 OBJETIVO

O objetivo deste estudo foi investigar o comportamento e as relações da densidade básica, ângulo microfibrilar e ocorrência de *slip planes* na parede celular com as propriedades mecânicas da madeira de *Tectona grandis*.

Para isso, foram consideradas diferentes posições de amostragem no sentido-medula casca no caule.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Madeira como material estrutural

Ao longo da história a madeira se tornou um material altamente versátil para o homem, satisfazendo suas necessidades de matéria prima para defesa, habitação, transporte, armas, preparo de alimentos ou fabricação de outros materiais. Isso devido, principalmente, a sua fácil trabalhabilidade, disponibilidade, heterogeneidade e excelente comportamento frente a outros materiais.

Como material de construção, a madeira apresenta-se até o século XVI como opções para diversos usos. Porém, rapidamente desconsiderada pela grande relevância que foram adquirindo o ferro, o concreto armado e as novas técnicas de construção, mesmo considerando a escassez de dados técnicos confiáveis (Aguilar; Guzowski, 2011). Somente a partir dos primeiros anos do Século XX que, segundo Esteban *et al.* (2002), se iniciou a caracterização formal da madeira com a implementação, do Laboratório de Produtos Florestais dos Estados Unidos (LPF). No LPF foi desenvolvida metodologia operacional normalizada para avaliar, estudar e obter informações confiáveis de seus atributos, especificamente propriedades físico-mecânicas, fato que melhorou a sua imagem, permitindo que na atualidade a madeira possa competir em igualdade de condições frente a outros materiais. Simultaneamente aos trabalhos desenvolvidos no LPF, laboratórios em outras regiões do mundo como na Alemanha, França, Inglaterra, China e Japão, entre outras, muito contribuíram para o conhecimento e utilização da madeira.

Na atualidade se sabe que como material de construção a madeira pode ser superior a outros materiais em vários aspectos. Em termos de propriedades, Calil Júnior e Dias (1997) apontaram que na relação resistência/densidade a madeira é quase três vezes superior ao aço e dez vezes superior ao concreto e em energia necessária para seu processamento, mostra ser um material mais ecológico. Essas razões têm sido fundamentais para que a madeira ainda seja utilizada na construção de escadas, casas, embarcações, pontes, equipamentos esportivos cadeiras, mesas, pisos e considerada cada vez mais para usos pouco tradicionais, tais como construção de vigas de grande vão, fabricação de blocos e pranchas de madeira cimento, matéria prima para fabricação de embalagens, e componentes aeroespaciais. Recentemente com o desenvolvimento da madeira laminada colada e da madeira laminada cruzada, esta matéria prima passou a ser empregada também na construção de grandes estruturas.

### 3.2 Estrutura e ultraestrutura da madeira

Estruturalmente a madeira é formada por diferentes células, que contrastam tanto em forma e tamanho, de cavidades comumente vazias ou parcialmente cheias de gomas, resinas ou tiloses (Fengel; Wegener, 1989) que encontram-se ligadas entre si pela lamela média, camada constituída em essência por lignina e pectinas que atuam como adesivo intercelular (Donaldson, 2019). Porém, a lignina também está presente, em maior quantidade, dentro da parede celular (Panshin; De Zeeuw, 1980).

De acordo com a origem da madeira, se coníferas ou folhosas, a sua estrutura pode estar basicamente constituída por um tipo de célula ou vários tipos. No caso das madeiras de coníferas, também chamadas de madeiras macias (*softwoods*), os traqueídeos que comumente medem entre 2,0 e 5,0 mm de comprimento, são os elementos celulares que dominam a sua composição (Rowel, 2005), com porcentagens que podem representar entre 90% e 95% de seu volume segundo a espécie (Fengel; Wegener, 1989).

As madeiras de folhosas, também citadas como madeiras duras (*hardwoods*), são por sua vez mais diversas estruturalmente que as de coníferas. Elementos de vasos, parênquimas e fibras libriformes, de 1,0 a 2,0 mm de comprimentos, são em essência os três tipos de células de sua estrutura (Rowel, 2005). Das anteriores, as fibras são as células mais abundantes e rígidas (Alméras *et al.*, 2017), podendo constituir entre 20% e 80% do seu volume (Richter; Burger, 1978). Por tais razões, no estudo da madeira as fibras e traqueídeos são consideradas de grande relevância.

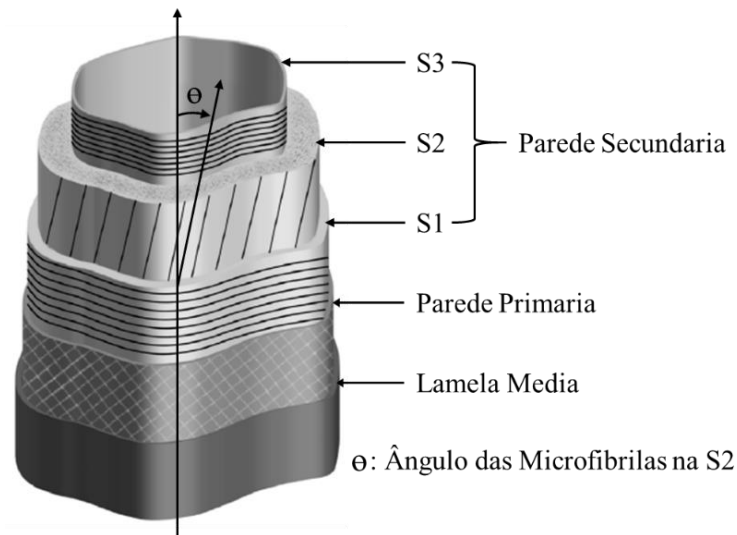
No nível ultraestrutural, que abrange áreas da constituição, organização e escultura da parede celular (Côté Jr, 1977), elementos estruturais da madeira (fibras e traqueídeos) encontram-se formados por duas camadas chamadas de parede primária e parede secundária (Fengel; Wegener, 1989) e estas, por sua vez, constituídas por microfibrilas celulósicas que apresentam-se imersas numa matriz de polissacarídeos tais como lignina, hemiceluloses e pectina (Harris, 2006).

Tanto em fibras como traqueídeos a parede primária apresenta-se como uma estrutura sem subdivisões. No entanto, a parede secundária, em geral, encontra-se subdividida nas camadas S1, S2 e S3 (Wardrop; Preston, 1947), como ilustrado na Figura 3.1, ou no caso de fibras de camada gelatinosa (G), do lenho de tração de algumas folhosas, subdividida nas camadas S1 e G; S1, S2 e G ou nas camadas S1, S2, S3 e G (Ruelle, 2014).

Em madeira normal a parede secundária representa sempre a maior porcentagem da parede celular em todos os elementos celulares. No caso de traqueídeos do lenho tardio das

coníferas e fibras libriformes das folhosas, a parede celular pode apresentar espessuras elevadas por causa da influência direta da camada S2, capaz de representar mais de 90% da parede celular (Fengel; Wegener 1989).

Figura 3.1 – Diagrama da estrutura geral de uma fibra de madeira.



Fonte: Adaptado de Donaldson (2019)

### 3.3 Propriedades mecânicas da madeira e seu vínculo com o uso construtivo

Na maioria das utilizações da madeira, as propriedades mecânicas são consideradas de grande relevância uma vez que o conhecimento de suas magnitudes permite seu melhor aproveitamento (Carreira *et al.*, 2012; Fiorelli; Dias, 2011) e podem incidir significativamente na seleção de espécies mais adequadas para diversos usos (Couto *et al.*, 2012). No caso de aplicações estruturais ou para produtos de madeira maciça, a rigidez e a resistência são catalogadas como fundamentais uma vez que podem impactar drasticamente na capacidade de serviço da estrutura, eficiência da construção, na conversão da madeira ou em outras de suas propriedades (Zhang, 2003).

#### 3.3.1 Rigidez e resistência

A rigidez refere-se à capacidade de um material, estrutura ou corpo de suportar carga, força ou tensão sem adquirir grandes deformações. Do ponto de vista da engenharia é definida como uma magnitude de oposição à deformação elástica de um corpo ou material, resultante da aplicação de força no mesmo (Baumgart, 2000). Enquanto que a resistência, esforço de ruptura ou resistência máxima, como o esforço unitário que apresenta-se na ruptura ou justo

antes da mesma (Parker, 2005). De acordo com Zhang (2003), as duas propriedades são relevantes atributos de qualidades em situações onde a madeira é visualizada como material estrutural ou para confecção de produtos de madeira maciça. Porém, a utilização de qualquer espécie de madeira como material de construção encontra-se condicionada, principalmente, pela rigidez (Madsen; Nielsen; 1992), comumente apontada como de maior relevância. Por isso, Leite *et al.* (2012) relatam que a rigidez é uma das propriedades mecânicas mais estudadas.

Em aplicações estruturais, a rigidez da madeira à compressão paralela às fibras encontra-se entre as propriedades mecânicas mais importantes (Lin *et al.*, 2007), da mesma forma que a rigidez determinada pela flexão estática. Segundo Yang e Evans (2003), essa última tem ganhado atenção significativa nos últimos anos especialmente quando trata-se de madeira procedente de plantios comerciais de rápido crescimento. De acordo com os pesquisadores, madeira dessas procedências são vinculadas a grandes proporções de madeira juvenil, material caracterizado por apresentar baixos valores de rigidez.

Conhecer o valor da rigidez da madeira passa por determinar o seu Módulo de Elasticidade (MOE), dado que é o parâmetro que indica o valor da mesma (Hein *et al.*, 2009). Chama-se de MOE à relação entre o esforço unitário e deformação unitária, sempre que o primeiro não ultrapasse o limite elástico do material. Denota-se também por meio do símbolo  $E$  e se expressa em unidades de força sobre área. Para madeira, segundo espécie e tipo, geralmente varia entre  $E = 1.000.000 \text{ lb/pol}^2$  a cerca de  $E = 1.900.000 \text{ lb/pol}^2$  (7 a 13 GPa) e no caso do aço estrutural, por exemplo, com valores que oscilam próximos a  $29.000.000 \text{ lb/pol}^2$  (200 GPa) (Parker, 2005). Dado que o aço é mais rígido do que a madeira, evidencia-se que quanto maior o valor do parâmetro mais rígido é o material.

Quanto à relevância do MOE, a sua importância reside em ser imprescindível na engenharia, especificamente no cálculo das dimensões de estruturas ou elementos estruturais. De acordo com Parker (2005), no caso de madeira estrutural é indispensável para a estimativa de flechas de vigas, ou seja, para determinação de deflexões dentro do limite elástico do elemento.

### **3.4 Caracterização mecânica da madeira**

Existem diferentes formas de determinar as medidas das propriedades mecânicas características da madeira, ou seja, as suas medidas de rigidez e resistência. A forma clássica de determinar ambas envolve utilização do método destrutivo, ou métodos classificados como não destrutivos (Leite *et al.*, 2012) no caso do parâmetro que indica a sua rigidez. No entanto,

cabe sinalizar que ao tratar-se de madeira com fins construtivos, estruturais, as propriedades mecânicas são representadas principalmente pelo MOE em compressão paralela às fibras e em flexão estática. Isso é assim uma vez que a prática atual de desenho para membros de madeira baseia-se na teoria elástica, enquanto acima do limite elástico são produzidas deformações permanentes (Parker, 2005).

Quanto ao MOE, a forma clássica de determinar o seu valor é mediante avaliação destrutiva, pelo método da flexão estática; quanto à não destrutiva por métodos como vibração transversal, ultrassom e ondas de tensão.

### **3.4.1 Flexão estática**

A flexão estática considera-se por excelência o ensaio mecânico da madeira para fins estruturais, uma vez que integra esforços de compressão, tração e cisalhamento no material avaliado (Cown, Hebert e Ball, 1999). Como regra geral, o método de ensaio de flexão estática é executado na máquina de ensaio universal demandando entre 5 a 15 minutos para a análise de cada amostra dependendo da espécie e condições de ensaio a serem usadas (Leite *et al.*, 2012).

O ensaio de flexão estática é regulado por normas técnicas (*American Society for Testing and Materials* (ASTM); *International Standardization Organization* (ISO); Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT); *Comisión Panamericana de Normas Técnicas* (COPANT) entre outros) que definem, entre vários requerimentos, o estado, orientação e dimensões da madeira a avaliar, velocidade da carga e diretrizes para determinação da rigidez e resistência de qualquer espécie de madeira.

A nível de investigação, o ensaio por flexão estática é considerado um dos métodos avaliativos mais sensíveis e que provê melhores resultados quando trata-se de determinar influências de variáveis intrínsecas da madeira em suas propriedades mecânicas.

### **3.4.2 Vibração transversal**

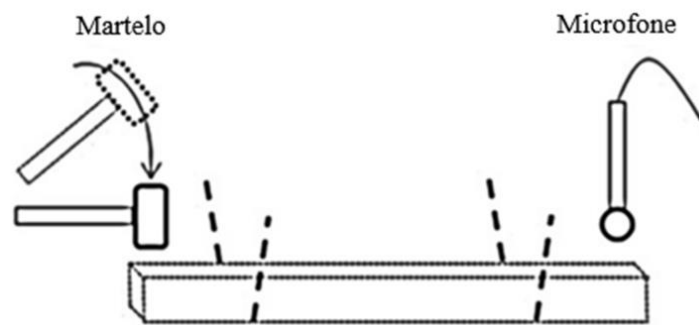
O método de vibração transversal também é comumente nomeado na literatura como "método de ressonância" (Targa; Ballarin; Biaggioni, 2005), "*resonance flexure method*" (Haines; Leban; Herbe, 1996).

Na avaliação mecânica da madeira, a vibração transversal é considerada como o método não destrutivo de mais baixo custo e efetivo para caracterização das propriedades elásticas (Brancheriau *et al.*, 2006). Destaca-se entre os demais métodos de ensaio não

destrutivos especialmente pela grande aderência entre o modelo físico do fenômeno e correspondente modelo matemático teórico (Targa; Ballarin; Biaggioni, 2005).

Na avaliação por vibração transversal a frequência natural de vibração do material é correlacionada com sua rigidez na flexão, considerando as virtudes de armazenamento e dissipação de energia, bem como as propriedades de cada material. Para iniciar a vibração pode ser aplicado um impacto, Figura 3.2, quando uma força restauradora tenderá a levar a barra a seu estado de equilíbrio. Antes disso acontecer, um ciclo completo de movimento produzirá o período de vibração, e por sua vez, o número de ciclos por tempo específico determinará a frequência vibracional (Carreira; Candian, 2008).

Figura 3.2 – Avaliação não destrutiva pelo método de vibração transversal



Fonte: Hein *et al.* (2012)

Em geral a coleta de dados nos testes de vibração transversal se considerada simples; diferentes estudos com madeiras de distintas dimensões corroboram a efetividade do método quando comparado, principalmente, com os resultados do MOE obtidos mediante flexão estática.

Leite *et al.* (2012), avaliando as propriedades dinâmicas elásticas em corpos de prova normalizados de madeira de *Copaifera langsdorffii* Desf, observaram forte relação de dependência ( $R^2 = 0,88$ ) entre o módulo de elasticidade analisado pela vibração transversal, módulo de elasticidade dinâmico, MOEd e o MOE determinado pela flexão estática. Carreira e Candian (2008) tentando classificar peças de madeira de *Goupia glabra* de dimensões estruturais (5 cm x 10 cm x 300 cm) com um equipamento produzido no Brasil, reportaram resultados similares ( $R^2 = 0,89$ ).

Outros pesquisadores (Carrasco *et al.*, 2017; Haines; Leban; Herbe, 1996; Ilic, 2003) também destacaram a efetividade e sensibilidade da avaliação por vibração transversal na determinação do MOE da madeira, sempre em comparação com resultados da flexão estática.

Porém, são escassos os estudos que relatam sobre o efeito de variáveis intrínsecas da madeira, como as ultraestruturais.

### **3.5 Densidade e variáveis ultraestruturais vinculadas às propriedades mecânicas**

#### **3.5.1 Densidade**

A densidade é por excelência a propriedade física mais importante da madeira. Segundo Couto *et al.* (2012), o fato é atribuído à sua boa correlação com as demais propriedades e à alta influência que exerce nos diversos processos em que participa. Porém, devido à sua estreita relação com características anatômicas do material (Zhang, 2003), não deve ser usada como único atributo de qualidade, uma vez que dependendo do uso pode não ser conclusivo (Flórez, 2012).

De acordo com Zobel e Buijtenen (1989), na madeira a densidade é decorrente de complexas combinações de variáveis químico-anatômicas mesmas que a sua vês são influenciadas principalmente pela idade da árvore, genótipo e condições ambientais. Em termos práticos a propriedade está dada pela relação massa/volume. Na literatura, comumente, refere-se à mesma de três formas; densidade real, aparente e básica. A primeira não considera espaços vazios do material e por apresentar pouca variação entre espécies está representada por valor fixo de  $1,53 \text{ g/cm}^3$  (Vital, 1984). A segunda, dada pela mesma relação, considera para ambas variáveis mesmo estado de umidade na sua determinação (Panshin; De Zeeuw, 1980). A terceira e mais utilizada na comparação e caracterização de espécies, também está dada pela relação massa seca/volume verde.

Diversos fatores podem incidir na densidade da madeira, tanto externos como aqueles inerentes à mesma. Em relação aos últimos, Scanavaca Junior e Garcia (2004) e Nugroho *et al.* (2012) assinalaram, respectivamente, a proporção de constituintes químicos (lignina, celulose, hemiceluloses e extrativos) e magnitude de elementos anatômicos (tamanho de células e espessura da parede) como fatores de grande relevância, argumentando que a propriedade não é mais que o reflexo dos anteriores. Outros pesquisadores (Ferreira; Kageyama, 1978), consideraram o gênero, espécie, idade da árvore, taxa de crescimento, condições de plantio e posição da madeira no tronco (radial e longitudinal) como fatores que podem exercer influência significativa na propriedade.

Quanto ao comportamento da densidade básica nas diferentes posições do tronco (radial e longitudinal), Foelkel *et al.* (1983) relataram que a propriedade física geralmente crescente no sentido medula casca, aumentando gradualmente do cerne para o alburno. Já no sentido longitudinal Panshin e De Zeeuw (1980) indicaram diversos padrões de variação:

decréscimo uniforme no sentido base-topo; diminuição no sentido base-topo até certo ponto e logo aumento, eventualmente podendo diminuir na parte alta ou superior e aumento no sentido base-topo, sem padrão de variação uniforme.

### 3.5.2 Ângulo microfibrilar

O ângulo microfibrilar (AMF), ou ângulo das microfibrilas, da parede celular das fibras, refere-se ao ângulo das microfibrilas de celulose em relação ao eixo longitudinal da fibra (Cave, 1968). Segundo Lima, Ribeiro e Narciso (2014), é das características mais importantes da madeira, sendo que a mesma pode ajudar a explicar o seu comportamento mecânico.

De acordo com pesquisadores como Donaldson e Xu (2005), o AMF pode ocorrer de forma desigual nas distintas camadas da parede dos elementos estruturais da madeira. Na parede primária as microfibrilas apresentam ângulos indefinidos, já nas diferentes camadas da parede secundária ângulos específicos, que em conjunto conferem à parede estrutura de um compensado (Harris, 2006). Segundo Wardrop e Preston (1947) na camada S1 e S3 as microfibrilas encontram-se orientadas de forma quase perpendicular ao eixo longitudinal da fibra, enquanto que na camada S2, é orientada mais próxima ao eixo da mesma (Figura 3.1).

Donaldson (2008) relatou que o contraste angular das microfibrilas na parede celular proporciona qualidades mecânicas à madeira e que a predominância da camada S2 na parede influencia propriedades físico-mecânicas e químicas da madeira. Em relação a isso, para Bendtsen e Senft (1968) o AMF da camada S2 é considerado como indicativo da qualidade da madeira. Segundo Barnett e Bonham (2004) isso deve-se a sua relação direta com a rigidez da madeira, assim como com outras propriedades. Em geral, baixos AMFs estão vinculados a altos valores de resistência e rigidez (Donaldson, 2008)

A variação do AMF também tem sido observada nos sentidos medula-casca e base-topo no caule das árvores. Alguns pesquisadores (Donaldson, 2008; Sarén *et al.*, 2004) relataram que as variações mais acentuadas do AMF podem ser encontradas na direção radial, em cinco anéis mais velhos da árvore. Investigações realizadas por Vainio *et al.* (2002) e Lima, Breese e Cahalan, (2004) em espécies de coníferas e folhosas, respectivamente, concordaram sobre o comportamento radial do AMF, reportando-se em ambos os casos, sua diminuição no sentido medula-casca. Posteriormente Ramos *et al.* (2011) caracterizando o lenho de *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex em três posições radiais, também reportaram o mesmo comportamento decrescente através de avaliação por microscopia de luz polarizada. Lima, Ribeiro e Narciso (2014) estudando o AMF em relação à idade cambial em *Eucalyptus*

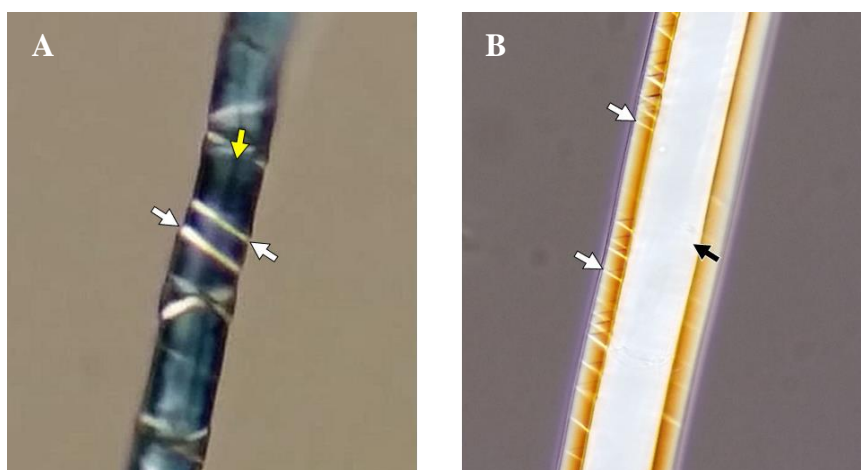
*grandis*, constataram decréscimo dessa característica, ao avaliar os primeiros 25 anéis, sentido medula-casca.

### 3.5.3 Slip plane

Os *slip planes*, também referenciados como *dislocations*, ou *microcompressions* (Nyholm *et al.*, 2001), são deformações ou falhas que se desenvolvem na parede celular das fibras (Robinson, 1920), devido a tensões de compressão que podem ocorrer anteriormente à ruptura da madeira (Bienfait, 1926). Segundo Dinwoodie (1968), começam a sua formação em níveis de tensão compreendidas na faixa elástica da madeira. Um termo correspondente a essas deformações em português poderia ser *vincos*. Entretanto, esse termo ainda não é adotado nos compêndios de nomenclatura em português.

Na Figura 3.3 mostra-se porções de fibras madeira, na microscopia de luz polarizada, de diferentes espécies com *slip plane*. Observa-se distintas espessuras da parede, larguras das fibras e ângulo da variável dos slip planes. Setas brancas da Figura 3.3 A e B indicam *slip planes*, quanto que setas amarela e preta, respectivas regiões do lume de cada segmento de Fibra.

Figura 3.3 – Segmentos de fibras das madeiras de *Eucalyptus* sp e de *Tectona grandis* com *slip planes*.



Legenda: A – Segmento de fibra de madeira de *Eucalyptus* sp com múltiplos *slip planes*; B – Segmento de fibra da madeira de *Tectona grandis* com vários *slip planes*, mais visíveis do lado esquerdo da fibra devido à falta de foco causado pela sinuosidade da fibra.

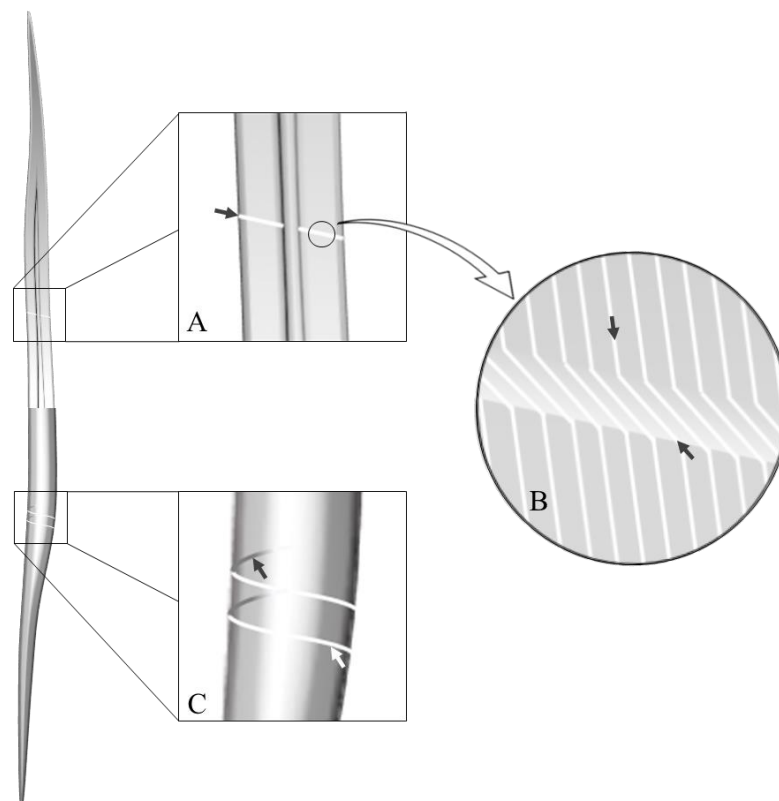
Fonte: Do autor (2022)

Pesquisadores como Côté Jr. e Hanna (1983) relataram que o aparecimento do *slip plane* nos elementos estruturais da madeira pode acontecer em três fases sequenciais: intercelular, intracelular e transversalmente à parede celular:

- a) Intercelular- refere-se à separação da fibra com a lamela média, segundo Bienfait (1926), por deslocamento automático da fibra com a célula vizinha;
- b) Intracelular- relacionado à falha da parede secundária, frequentemente na interface da camada S1 e S2, segundo Dinwoodie (1974), falha de cisalhamento dos feixes de celulose por flexão da fibra, que provocará reorganização microfibrilar (*slip plane*).
- c) Transversalmente à parede celular- quando ocorre a ruptura total da parede celular da fibra.

Na Figura 3.4 mostra-se a representação esquemática da fibra da madeira com *slip planes* para facilitar sua compreensão. São exemplificadas diferentes visualizações (seções A, B e C) dessa variável na parede celular. Setas pretas e brancas da seção A e C indicam as visualizações de *slip planes* nas paredes cortadas e não cortadas longitudinalmente, respectivamente. A seta preta superior da seção B mostra microfibrilas de celulose não deslocadas. A seta preta inferior indica as microfibrilas deslocadas.

Figura 3.4 – Esquema de fibras de madeira com *slip planes*.



Legenda: A – *Slip plane* em seção de fibra de madeira cortada longitudinalmente; B – *Slip planes* em seção de fibra não cortada longitudinalmente; C – *Slip planes* visíveis em seções contínuas da fibra cortada longitudinalmente.

O desenvolvimento do *slip plane* nos elementos estruturais da madeira pode ocorrer por causas naturais ou induzidas. Entre as causas naturais, estão as geradas por fatores ambientais como o vento e características da árvore, entre aquelas causadas por tensões de crescimento; enquanto nas induzidas, são as geradas por intervenções humanas, como o corte com queda da árvore e o processamento da madeira (Moulin, 2017).

De acordo com Thygesen e Asgharipour (2008) os *slip planes* em uma árvore em pé curvada pelo vento, podem-se desenvolver na parte interna da curvatura do caule, com maior intensidade na parte mais próxima à casca, região caracterizada por sofrer tensões compressivas. As tensões de crescimento também parecem estar relacionadas aos *slip planes*, uma vez que alguns autores (Wilkins; Alexiou, 1991) relataram relação direta entre estas duas variáveis.

A literatura disponível sobre os *slip planes* dos elementos estruturais da madeira é escassa em relação a outras características; ainda menor, quando relacionada a sua quantificação e efeitos na utilização da madeira (Durães, 2021). Considerando que sua ocorrência pode alterar as propriedades da madeira, entre essas as mecânicas (Lima, 1999), necessita-se de investigações mais aprofundadas para constatar tais alterações (Moulin, 2017).

Entre alguns dos estudos mais relevantes sobre *slip planes*, especificamente sobre o nível de força que causa sua ocorrência, encontram-se as de Dinwoodie (1978) e Hoffmeyer (1993). O primeiro, aplicando forças compressivas axiais de 25, 35, 50, 65 e 80% da resistência máxima em peças de alburno de *Picea abies*, conseguiram identificar ocorrência do *slip plane* ao nível de carga mínima, após examinar lâminas de 50 µm com microscopia de luz polarizada. Já Hoffmeyer (1993) ao aplicarem cargas de 30 e 50% da resistência máxima da madeira, não reportaram diferenças na ocorrência de *slip plane*, para as porcentagens de cargas utilizadas. Como a deformação da madeira depende de sua rigidez, é possível que madeiras diferentes iniciem a formação de *slip plane* em diferentes cargas iniciais.

Outros estudos como os de Dinwoodie (1966) e Hartler (1969), forneceram informações importantes sobre a ocorrência de *slip planes* na microtomia; sendo encontrado no primeiro, relação direta entre sua ocorrência e o ângulo horizontal da navalha. Ambos pesquisadores classificaram estes como “artefatos”, *slip planes* induzidos pela tensão compressiva gerada durante o corte na microtomia, sugerindo a sua minimização em termos de quantidade, com uso de navalha sempre afiada e pequeno ângulo de corte horizontal da navalha.

### 3.6 Microscopia de luz polarizada

A microscopia de luz polarizada ou microscopia ótica de luz polarizada (MOLP) tem sido amplamente utilizada desde o século passado especialmente na caracterização de minerais (Langer, 1974). Na atualidade é aplicada satisfatoriamente em áreas como a química, geologia, engenharia de materiais e biologia; na caracterização de polímeros, fibras minerais, macromoléculas biológicas, madeira, entre outros.

A microscopia de luz polarizada é uma técnica de incremento de contraste que maximiza a qualidade da imagem ao analisar materiais birrefringentes (Langer, 1974), ou seja, materiais com diferentes índices de refração (materiais anisotrópicos). De acordo com Robinson e Davidson (2015) a mesma baseia-se no princípio de transformação da luz não polarizada em polarizada, considerando uma lente chamada de polarizador, capaz de redirecionar a propagação de ondas de luz não polarizada em um mesmo plano.

Quando as estruturas cristalinas de um material analisado, na microscopia de luz polarizada, não são paralelas às ondas de luz polarizada, estas dividirão as ondas de luz polarizadas dando como resultado sua clara visualização; no caso específico a amostra aparecerá “iluminada”. No entanto, quando as estruturas cristalinas estiverem paralelas às ondas de luz polarizada a amostra analisada ficará na chamada posição de “extinção”, onde se tornará escura (Langer, 1974).

Dado que a parede dos elementos anatômicos da madeira está constituída em maior parte por celulose, constituinte caracterizado por apresentar regiões cristalinas e amorfas, que agrupa-se em estruturas altamente alinhadas (Müller *et al.*, 1998), a microscopia de luz polarizada torna-se uma técnica eficaz na caracterização da sua ultraestrutura, especificamente para determinação do AMF e caracterização dos *slip planes* dos elementos estruturais desse material.

A microscopia de luz polarizada também é empregada para medição do AMF usado como variável independente em modelos para estimativa do AMF pelo método de difração de raios-X, como investigado por Souza, Lima e Soares (2022).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Local de coleta

As árvores utilizadas neste estudo foram coletadas no Município de Belo Oriente – MG, na região Sudeste do Brasil em fazenda da CENIBRA SA. A área é localizada na mesorregião VIII do Rio Doce, microrregião 25 – Ipatinga, a 19° 13' 04" de latitude sul e 42° 27' 26" longitude oeste, com altitude máxima de 785 m e mínima de 236 m sobre o nível do mar. A área é de clima úmido e verões quentes, de temperatura média máxima anual de 28,3°C, média mínima anual de 19,1°C e média anual de 23,5°C; Com índice pluviométrico anual de 1374 mm (MG, 2011).

### 4.2 Características do material de coleta

O material para estudo foi constituído de toras de 3 metros, Figura 3-A, de cinco árvores de *Tectona grandis* de 38 anos de idade com DAPs entre 0,29 m e 0,33 m provenientes de plantio (1,14 ha) seminal com espaçamento de 3 x 2 m, sem intervenção de desbaste ou poda.

### 4.3 Amostragem e processamento do material

As toras foram desdobradas na Unidade Experimental de Desdobro e Secagem da Madeira da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em serra de fita vertical, procurando obter pranchões centrais com espessura de 10 cm com medula centralizada (Conforme ilustrado na Figura 4.1-B).

Os pranchões foram seccionados de forma perpendicular a seu comprimento gerando-se três sub-pranchões de igual comprimento, Figura 4.1-C, com objetivo de maximizar o rendimento e qualidade do material desdobrado. Posteriormente, cada sub-pranchão foi identificado e desdobrado em peças de 3 x 10 x 90 cm em serra circular, considerando cortes tangenciais aos anéis de crescimento e paralelos à casca, Figura 4.1-C. A implementação dessa técnica de desdobro possibilitou a produção de peças predominantemente tangenciais, ideais para obtenção de corpos-de-prova para testes mecânicos.

Após o desdobro, as peças obtidas, Figura 4.1-D, foram empilhadas objetivando a sua secagem ao ar até atingir umidade de equilíbrio ( $\pm 18\%$ ), logo colocadas na câmara climática (a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa de  $60 \pm 5\%$ ), até alcançar 12% de umidade. Atingindo massa constante, as peças foram processadas e obtidos sarrafos de 2,5 x 2,5 cm de seção e 90 cm de comprimento, Figura 4; que foram inspecionados de forma visual com o objetivo de identificar a distribuição de corpos-de-prova sem defeitos. Na inspeção foi verificado que a

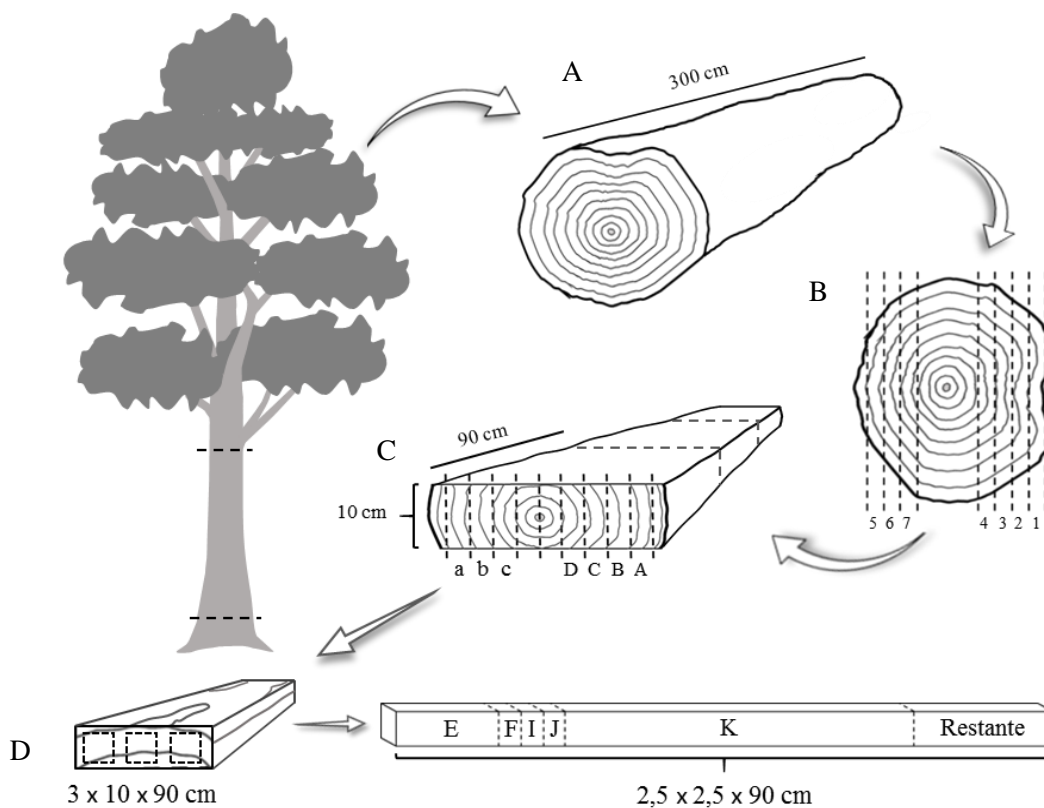
maior quantidade e melhor qualidade (poucos nós e peças mais bem orientadas) de CP era obtida da base da tora, excetuando-se o lenho juvenil, considerando-se o objetivo da pesquisa. Foi considerado utilizar unicamente os CP do primeiro torete das toras (toretas da base).

Cabe ressaltar que o acompanhamento do conteúdo de umidade da madeira durante todo o seu processamento foi realizado considerando o método gravimétrico.

### 4.3.1 Confecção dos corpos-de-prova

Cada sarrafo foi seccionado de forma perpendicular a seu comprimento gerando-se CP para ensaios de compressão paralela às fibras com dimensões de 2,5 cm x 2,5 cm x 10 cm; para determinação da densidade básica de 2,5 cm x 2,5 cm x 2,5 cm; para análises do ângulo microfibrilar de 2,5 cm x 2,5 cm x 2,5 cm; para quantificação de *slip planes* de 2,5 cm x 2,5 cm x 2,5 cm e para ensaios de flexão estática e dinâmica de 2,5 cm x 2,5 cm x 41 cm (como ilustrado na Figura 4.1-E).

Figura 4.1 – Esquema do processo de obtenção de corpos-de-prova e amostras para testes mecânicos, físicos e análises anatômicas.



Legenda: E – CP para compressão paralela às fibras; F – Amostra para densidade básica; I – Amostra para ângulo microfibrilar; J – Amostra para *slip planes*; K – CP para flexão estática e dinâmica.

#### 4.4 Densidade básica

Foi determinada a densidade básica conforme a Norma Brasileira NBR 11941 (ABNT, 2003), utilizando-se amostras de três posições radiais, próxima à medula (interna), intermediária e próxima à casca (externa).

#### 4.5 Caracterização ultraestrutural

##### 4.5.1 Ângulo microfibrilar

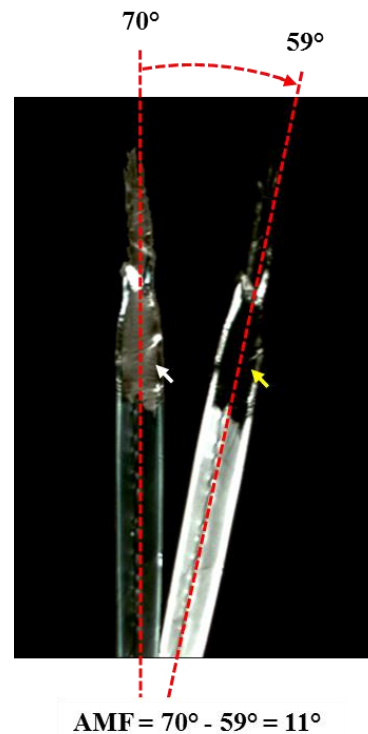
Para determinação do ângulo microfibrilar (AMF) foram realizados cortes histológicos tangenciais de 8  $\mu\text{m}$  de espessura, paralelos ao comprimento das fibras, objetivando cortar as fibras em duas partes longitudinais. O material obtido foi colocado em frascos de vidro contendo solução de ácido acético glacial e peróxido de hidrogênio, em proporção 1:1 v/v (Franklin, 1945). Os frascos foram vedados, para serem colocados em estufa por 10 horas a 60°C. Passado o tempo, as amostras foram retiradas da estufa, lavadas, e montadas em lâminas temporárias.

A medição do AMF da parede celular foi realizada com auxílio do microscópio de luz polarizada Olympus BX51, dotado com mesa giratória (goniômetro) de escala 0 - 360°, seguindo a metodologia de Lima *et al.* (2004).

Foram identificadas 30 fibras individuais cortadas longitudinalmente, próprias para medição do ângulo. As fibras foram alinhadas de forma vertical tomando cor acinzentada (Figura 4.2). Nesse ponto foi registrado o primeiro valor do goniômetro da mesa; a seguir a mesa foi girada para posicionar a fibra em ângulo em que a mesma tornou-se escura, ou seja, indicando a máxima extinção da luz, e assim foi registrado o segundo valor do ângulo (Figura 4.2). A diferença dos valores foi assumida como o valor do AMF da parede celular da fibra.

Na Figura 4.2, mostra-se parte do processo efetuado na determinação do ângulo microfibrilar. Seta branca da figura assinalando a região acinzentada da parede da fibra de madeira colocada na posição vertical, equivalente a 70° segundo registro do goniômetro, do plano visual durante a microscopia de luz polarizada. Seta amarela assinalando a região escura da parede ou ponto de máxima extinção da luz após rotação, sentido horário, do goniômetro. Deve-se notar que, na referida figura, apenas a ponta superior dessa fibra foi utilizada na medição.

Figura 4.2 – Determinação do ângulo microfibrilar por meio da microscopia de luz polarizada.



Fonte: Do autor (2022)

#### 4.5.2 Ocorrência de *slip planes*

A ocorrência de *slip planes* foi avaliada em termos espaciais e de magnitude, considerando a mesma amostragem radial realizada para densidade básica e quantidade de *slip planes* por milímetro ( $Q_{sp}/mm$ ). Para isso foram utilizadas fibras das amostras sinaladas referenciadas na Figura 4.1-J. As amostras foram seccionadas com formão, de forma paralela às fibras, com finalidade de produzir sub-amostras (palitos) de aproximadamente 4 mm x 4 mm de seção transversal, como indicado por Moulin e Lima (2019). Com o objetivo de evitar a formação de artefatos, comuns de serem formados pela microtomia.

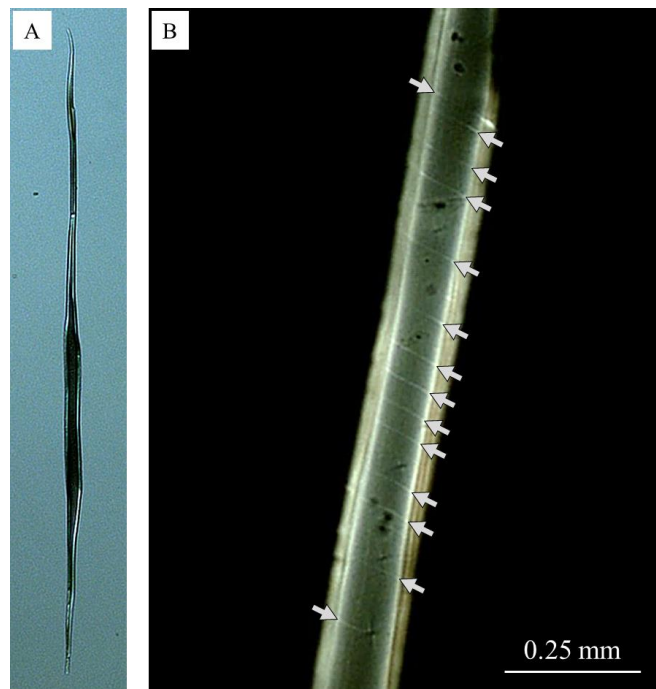
As sub-amostras foram processadas seguindo procedimentos descritos no item 4.5.1 para obtenção de macerado de fibras. Alíquota do macerado foi depositada em lâminas temporárias impregnadas com glicerina, para análise.

A visualização e a quantificação de *slip planes* foram realizadas em 30 fibras com auxílio do microscópio Olympus BX-51, seu polarizador e analisador assim como com o *software* analisador de imagens *Image Pro Plus*. A quantificação de *slip planes* foi obtida em

quantidade por milímetro, mediante a relação quantidade total de *slip planes* ao longo da fibra, e o comprimento da mesma.

Na Figura 4.3, apresenta-se visualização completa da fibra de madeira de teca, seção A, com vários *slip planes*, seção B, por meio de microscopia de luz polariza. Visualização microscópica apresentada na secção A e B, permitiu a medição das variáveis empregadas no cálculo da quantidade de *slip plane* por milímetro.

Figura 4.3 – Visualizações da fibra de madeira de *Tectona grandis* por meio da microscopia de luz polarizada.



Legenda: A – Plano completo de uma fibra; B – Segmento da fibra com múltiplos *slip planes*.

Fonte: Do autor (2022)

Cabe assinalar que a visualização dos *slip planes*, para sua quantificação no perfil da fibra, foi realizada empregando as oculares do microscópio e não por meio de fotografias, (como apresentado na seção B da Figura 4.3), uma vez que nem sempre foi possível sua visualização por meio da câmera vinculada ao microscópio. Também que, foi necessário girar o polarizador do microscópio e goniômetro para obter a visualização dos *slip planes*.

## 4.6 Caracterização mecânica

### 4.6.1 Ensaio de flexão dinâmica

A determinação da rigidez pelo método não destrutivo considerou avaliação por vibração transversal. Foi determinado MOEd de 54 CP das três posições radiais do tronco

para a indução de *slip planes* e determinação do MOEd médio das três posições radiais do tronco. Para isso foi utilizado o *Software* e equipamento *Sonelastic*® (*ATCP instrument*) e especificações da Norma ASTM-E1876-01.

Cada corpo-de-prova foi colocado no suporte do equipamento, em seus pontos nodais, posteriormente excitados com impulso no seu extremo empregando pulsador manual. A excitação gerou vibrações que foram capturadas pelo microfone e transmitidas ao *Software* *Sonelastic*®, o qual realizou armazenamento de dados e cálculo (Equações 1 e 2) automático da medida de rigidez considerando as dimensões e massa do CP e frequência de ressonância fundamental flexional (Hz).

$$Ed = 0.9465 \left( \frac{mf_f^2}{L} \right) \left( \frac{c^3}{e^3} \right) T_1 \quad (1)$$

$$6,585(1 + 0,0752\mu + 0,8109\mu^2) - \left( \frac{t}{L} \right)^2 - 0,868 \left( \frac{t}{L} \right)^4 - \left[ \frac{8,34(1 + 0,2023\mu + 2,173\mu^2) \left( \frac{t}{L} \right)^4}{1 + 6,338(1 + 0,1408 + 1,536\mu^2) \left( \frac{t}{L} \right)^2} \right] \quad (2)$$

Em que, Ed: Módulo de elasticidade dinâmico (MPa);  $f_f$ : Frequência de ressonância fundamental flexional (Hz); m: Massa (g); c: Comprimento (mm); L: Largura (mm); e: Espessura (mm) e  $T_1$ : Fator de correção para o modo fundamental flexional dado pela Equação 4, sendo  $\mu$  o coeficiente de Poisson.

#### 4.6.2 Ensaio de compressão paralela às fibras

Foram avaliados 54 CP de três posições radiais do tronco para obter informações para a indução de *slip planes* e determinação do MOEc, seguindo as especificações estabelecidas pela norma D 143-94, método secundário, da *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2014).

#### 4.6.3 Ensaio de flexão estática

Foi determinado o Módulo de Elasticidade em flexão estática (MOEf), seguindo os parâmetros estabelecidos na norma D 143-94, método secundário (ASTM, 2014) da *American Society for Testing and Materials*, sendo considerados 42 corpos-de-prova de três posições radiais da primeira tora das árvores de teca, sendo 27 corpos-de-prova para experimento da indução de *slip planes* e 15 corpos-de-prova para determinação da rigidez das três posições radiais da madeira consideradas nesta pesquisa.

#### 4.7 Indução de *slip planes*

Objetivando-se gerar *slip planes*, foram pré-tensionados em compressão axial os CP da flexão estática das posições radiais, interna e externa do tronco. Foram aplicadas cargas correspondentes a 30%, 55% e 80% do valor da resistência máxima de cada CP, previamente determinada no teste de compressão axial.

Foram utilizados seis CP por tratamento, para verificar o efeito das cargas na geração dos *slip planes*, foram utilizados três CP como amostra por tratamento. De cada CP foi obtida uma sub-amostra de 2,5 cm x 2,5 cm x 2,5 cm, a 50% de seu comprimento. A preparação das sub-amostras e quantificação dos *slip planes* (em 20 fibras por amostra) foi realizada segundo item 4.5.2.

Dada verificação preliminar de ocorrência do fenômeno de flambagem (deflexão lateral por elevado índice de esbeltez) nos CP de flexão antes de atingir porcentagem de cargas relatadas nesta pesquisa (fato verificado por meio da equação reescrita de carga crítica de Euler, Equação 3 A, e verificado em provas preliminares), foi considerado estressar, em compressão axial, os CP de flexão em condições de contorno diferentes à clássica de compressão axial. Foram consideradas condições de contorno de extremidades fixas ou engastadas, uma vez que na teoria (Equação 3-A, considerando  $K=0.5$ ) e prática foi verificado que tais condições, geraram o colapso axial dos CP de flexão por tensão de compressão, antes que apresentasse flambagem.

$$\text{A) } \sigma_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \quad \text{B) } \sigma_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(K \cdot \lambda)^2} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{L}{r} \quad (4)$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (5)$$

$$I = \frac{b(h)^3}{12} \quad (6)$$

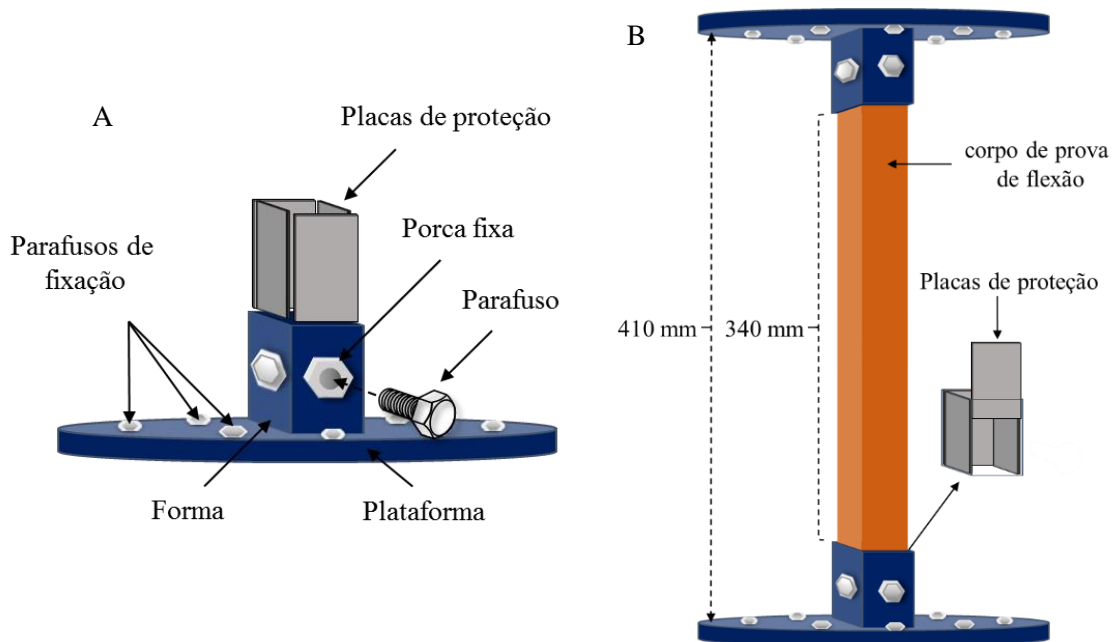
Em que:

$E$ : Módulo de elasticidade;  $\lambda$ : Índice de esbeltez;  $K$ : Coeficiente de longitude efetiva ( $K=1$  para peças com extremidades fixadas por pinos;  $K=0,7$  para peças com extremidade rígida e outra fixada por pinos;  $K=0,5$  para peças com extremidades fixadas ou engastadas;

$K=2$  para peças com extremidade livre e outra fixa);  $L$ : Comprimento da peça;  $r$ : Raio de giração;  $I$ : Inércia da peça;  $A$ : Área da seção transversal;  $b$ : Espessura da peça;  $h$ : Largura da peça.

Portanto, para atingir condições de contorno descritas acima, favoráveis para geração dos *slip planes*, foram confeccionados dois acessórios de aço (Figura 6 A) para serem fixados na máquina universal de ensaios e assegurar que não houvesse flambagem durante a tensão de compressão nos CP de flexão.

Figura 4.4 – Esquema de acessório de aço confeccionado e utilizado nos testes de compressão axial dos corpos de prova de flexão para contenção de flambagem.



Fonte: Do autor (2022).

Para o teste, cada CP foi colocado no interior dos acessórios previamente fixados na máquina universal. Com eles colocados sem fixar suas extremidades, foi gerada carga de 30 Kgf para garantir o contato de suas áreas transversais extremas na base do acessório. Esse procedimento foi realizado com o intuito de evitar o impacto das áreas transversais com a base do acessório, uma vez que foi verificado, em provas preliminares, que aproximadamente a 500 Kgf acontecia liberação dos extremos do CP fixados por pressão manual dos parafusos laterais.

A velocidade de carga para a indução dos *slip planes* foi a mesma utilizada no teste de compressão axial segundo norma D 143-94 (ASTM, 2014).

Os ensaios de compressão axial, flexão estática e indução de *slip planes* foram realizados no Laboratório de Propriedades Mecânicas da Madeira do Departamento de Ciências Florestais (DCF) da UFLA, com auxílio da máquina de ensaio universal EMIC DL - modelo 30 ton e célula de carga de 10.000 kg.

#### **4.8 Processo experimental nos corpos-de-prova para indução de *slip planes***

Os CP de flexão estática utilizados na indução de *slip planes* foram submetidos a diferentes processos na seguinte ordem:

- a) Avaliação não destrutiva (vibração transversal);
- b) Indução de *slip planes* (compressão axial em condições de extremidades fixas);
- c) Avaliação não destrutiva (vibração transversal);
- d) Avaliação destrutiva\* (flexão estática).

\*Somente na metade (27) dos CP utilizados na avaliação não destrutiva.

#### **4.9 Análise dos dados**

Foi empregada estatística descritivas, análises de variância e testes de Tukey a 5% de probabilidade de erro na avaliação dos dados da densidade básica, ângulo microfibrilar e quantidade de *slip planes* por milímetro em função das três posições radiais da tora. Também, análises de correlação e de regressão simples foram realizadas para avaliação das relações funcionais entre as propriedades mecânicas da madeira e demais variáveis analisadas. Para avaliar o efeito da aplicação de diferentes intensidades de cargas (pré-tensionamento) na medida de rigidez obtida na flexão dinâmica (MOEd) sob a formação de *slip plane* por milímetro, foram realizadas análises de variância em esquema fatorial duplo (3 posições radiais x 3 níveis de carga) a 5% e teste de Tukey de igual probabilidade de erro.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Densidade básica

Os valores médios da densidade básica (Tabela 5.1) foram distintos nas três posições radiais, flutuaram de 0,49 g.cm<sup>-3</sup> a 0,55 g.cm<sup>-3</sup>, com o menor e maior valor dessa variável para a posição externa e interna, respectivamente. Fato que contrasta com o geral reportado na literatura, em que são descritos maiores valores da propriedade para madeira da posição externa e menores para a posição interna.

Os coeficientes de variação foram pequenos e praticamente iguais entre posições radiais avaliadas (Tabela 5.1). Esses resultados foram considerados interessantes uma vez que a madeira avaliada foi proveniente de plantio seminal, onde não foram feitas intervenções silviculturais, desbastes e podas, para plantios comerciais.

Na Tabela 5.1 estão apresentados os resultados da estatística descritiva da densidade básica determinada nas madeiras das posições externa, intermediária e interna do tronco de cinco árvores de *Tectona grandis*.

Tabela 5.1 – Estatística descritiva da densidade básica da madeira de três posições radiais da base do tronco de cinco árvores de *Tectona grandis* de 38 anos de idade.

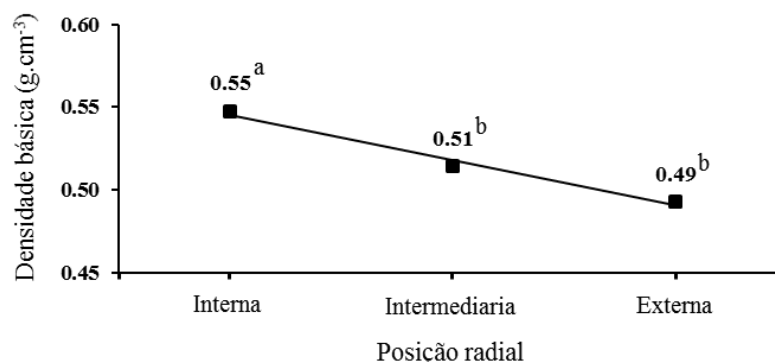
Posição radial	Densidade básica (g.cm <sup>-3</sup> )				
	Mínimo	Médio	Máximo	Dp	CV (%)
Externa	0,44	0,49	0,55	0,04	9,31
Intermediária	0,43	0,51	0,55	0,04	9,12
Interna	0,50	0,55	0,63	0,04	8,24

Dp = Desvio padrão; CV (%) = Coeficiente de variação.

Foi verificada tendência decrescente da densidade básica (Figura 5.1) partindo da parte interna para a externa do caule, com existência de diferença estatística significativa entre ao menos um par de médias das três posições radiais estudadas, segundo análise de variância a 5% de probabilidade de erro (ANEXO A).

Pelo teste de comparações múltiplas de Tukey, a 5% de probabilidade de erro (Figura 5.1), foi possível identificar existência das diferenças entre os valores médios da densidade básica das posições interna e intermediária e também entre valores médios das posições interna e externa. Não foi verificada existência de diferença estatística, entre valores médios da densidade básica das posições intermediária e externa.

Figura 5.1 – Comportamento radial da densidade básica da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.



Legenda: Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Do autor (2022)

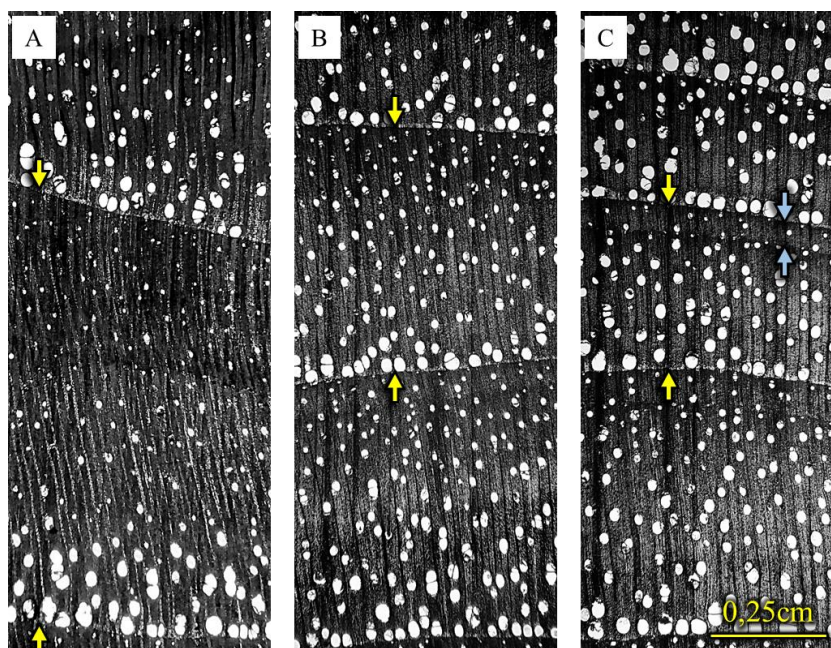
O comportamento decrescente da densidade básica verificado também foi observado por Melo *et al.* (2006) no estudo de variação radial da densidade básica de sete espécies de madeira de clima semi-árido. Gonçalves *et al.* (2007) avaliando caule de *Tectona grandis* dos Estados de São Paulo e Espírito Santo, com 12 e 5 anos de idade, respectivamente, reportaram comportamento semelhante da propriedade. Já Lima, Florsheim e Longui (2009) observaram incremento da propriedade física ao avaliar as mesmas posições radiais em tecas de 31 anos. Porém, não reportaram diferenças estatísticas entre os valores médios da propriedade em questão. Na literatura foi comum encontrar relatos que atribuem o aumento da densidade básica da madeira no sentido medula-casca a diferentes causas; por mudanças dimensionais dos elementos estruturais do caule (Tomazello Filho, 1987), ou em decorrência da variação do lenho juvenil para o lenho de maior maturidade (Ballarin e Palma, 2003; Serpa *et al.*, 2003). No entanto, foram observados poucos relatos que explicam o decréscimo da propriedade no sentido medula-casca.

Panshin, De Zeeuw e Brown (1964) relatam que o decréscimo da densidade encontra-se diretamente relacionado com a espessura dos anéis ou, ocasionalmente, ao crescimento extremamente lento das árvores durante períodos longos em espécies de porosidade difusa. Também a elevadas porcentagens de vasos em madeiras de troncos com altos incrementos de crescimentos. Segundo esses cientistas, a relação direta da densidade com a espessura dos anéis se dá especialmente em madeiras duras de porosidade em anel. Isso decorre da proporção de lenho tardio dessas madeiras, que se relaciona diretamente com a espessura do anel e, também, pelo fato de que a porcentagem do lenho inicial considera-se constante radialmente.

Portanto, o fato da madeira de *Tectona grandis* possuir porosidade em anéis (IAWA, 1989); possuir o lenho tardio maior densidade que o lenho inicial (Panshin, De Zeeuw e Brown, 1964); e ter sido observado nesta investigação, de forma tanto microscópica (Figura 5.2) como macroscópica marcada diferença da largura dos anéis entre amostras contíguas e extremas, respectivamente, poderia se explicar o comportamento decrescente da densidade no sentido medula-casca, e também as diferenças significativas encontradas entre os seus valores médios das posições radiais interna e externa. Porém, é necessário aprofundar no tema, nesse sentido seria interessante, por exemplo, considerar a variável fração parede, como empregada por Monteiro *et al.* (2017).

Na Figura 5.2 apresentam-se seções histológicas transversais das amostras das posições interna, intermediária e externa, da base do caule de *Tectona grandis*, de 38 anos. Na seção A, correspondente à posição interna, as setas amarelas delimitam o anel de maior largura nas três posições radiais. Na seção B, as setas amarelas indicam anéis de crescimento completos da posição intermediária que, em termos microscópicos e visuais, apresentou anéis de largura média aproximada, das três posições amostradas. Na seção C, as setas amarelas assinalam o início e o final do anel de crescimento de largura intermediária da seção externa. As setas azuis delimitam o falso anel de crescimento, comumente observado na *Tectona grandis*. Também é possível observar a característica da porosidade em anel da madeira.

Figura 5.2 – Seções histológicas transversais, de três posições radiais (A- posição interna; B- posição intermediária; C- posição externa) da base do caule *Tectona grandis*, aos 38 anos de idade.



Fonte: Do autor (2022)

Também pode ser observado na Figura 5.2, evidente aumento do número de elementos de vasos por unidade de área, partindo da seção histológica da posição interna, seção A, para a externa, seção C.

## 5.2 Ângulo microfibrilar

O ângulo microfibrilar (AMF) médio da parede celular das fibras correspondente à posição interna foi maior do que o AMF da posição externa (Tabela 5.2) com diferença de  $10^\circ$  entre as duas posições. Foram verificados altos CV% para as três posições radiais. Os mesmos que podem ser explicados pela sub-amostragem durante a microtomia, que permitiu obtenção de fibras do lenho inicial e tardio de distintos anéis de crescimento.

Na Tabela 5.2 estão apresentados os resultados da estatística descritiva das medições dos ângulos microfibrilares obtidos na avaliação das fibras nas posições externa, intermediária e interna da base do tronco de cinco árvores de *Tectona grandis*.

Tabela 5.2 – Estatística descritiva do ângulo microfibrilar de três posições radiais da base do tronco de cinco árvores de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Posição radial	Ângulo microfibrilar ( $^\circ$ )				
	Mínimo	Médio	Máximo	Dp	CV (%)
Externa	6	10,6	19	5,13	49,32
Intermediária	6	14,2	22	5,20	37,23
Interna	13	20,6	30	5,34	26,41

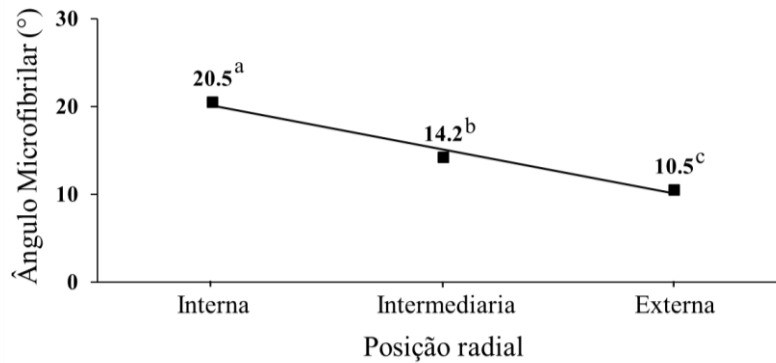
Dp = Desvio padrão; CV (%) = Coeficiente de variação.

Em termos de média, a variação do AMF das fibras da madeira de teca foi decrescente (Figura 5.3) apresentando variação média de  $5^\circ$  entre posições radiais contínuas. Foi verificada existência de diferenças estatisticamente significativas entre valores médios nas três posições radiais contínuas e extremas.

Na Figura 5.3 pode-se observar a variação do AMF das fibras em função da posição no tronco em cinco árvores de *Tectona grandis*. A variação foi estatisticamente significativa segundo análises de variância a 5% de probabilidade de erro. Observa-se no Anexo B, resumo da análises de variância. O comportamento decrescente do AMF observado está de acordo com os resultados de Bhat, Priya e Rugmini (2001) para madeira de *Tectona grandis*, de 63 anos de idade. Contudo, ocorreu tendência de estabilização do AMF após os 20 anos de idade das árvores. Também observou-se semelhança com resultado obtido por Lima, Breese e

Cahalan (2004); Ramos *et al.* (2011) e Souza *et al.* (2017), em outras madeiras de folhosas e também com os obtidos por Preston (1934) e Donaldson (1992), em coníferas.

Figura 5.3 – Comportamento radial do ângulo microfibrilar da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.



Legenda: Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Do autor (2022)

### 5.3 Quantidade de *slip planes* por milímetro

Fibras da madeira da posição interna apresentaram a maior quantidade de *slip plane* por mm ( $Q_{sp}/mm$ ). Em contraste, elementos estruturais da posição externa da base do tronco das árvores de teca apresentaram a menor  $Q_{sp}/mm$ , 2,42 e 1,87  $sp/mm$  respectivamente.

Na Tabela 5.3 apresentam-se resultados de estatística descritiva da quantidade de *slip planes* por milímetro nas fibras da madeira da posição externa, intermediária e interna do tronco de cinco árvores de *Tectona grandis*.

Tabela 5.3 – Estatística descritiva da quantidade de *slip planes* por milímetro de três posições radiais no tronco de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

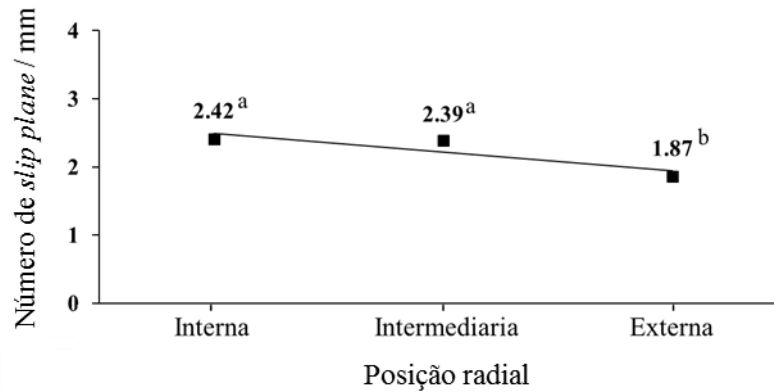
Posição radial	Quantidade de <i>slip planes</i> por milímetro				
	Mínimo	Médio	Máximo	Dp	CV (%)
Externa	0,57	1,87	5,64	1,46	68,16
Intermediária	0,68	2,39	8,62	1,44	63,63
Interna	0,76	2,42	6,96	1,45	52,99

Dp = Desvio padrão; CV (%) = Coeficiente de variação.

O comportamento da quantidade do *slip plane* por milímetro no sentido medula-casca do tronco das árvores de *Tectona grandis* foi ligeiramente decrescente, apresentou variação estatisticamente significativa segundo análise de variância a 5% de probabilidade de erro

(ANEXO C). Na Figura 5.4, apresenta-se o comportamento da  $Q_{sp}/mm$  no sentido radial do tronco de cinco árvores de *Tectona grandis*, aos 38 anos de idade.

Figura 5.4 – Comportamento radial da quantidade de *slip planes* por milímetro na madeira de *Tectona grandis*, aos 38 anos de idade.



Legenda: Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro.

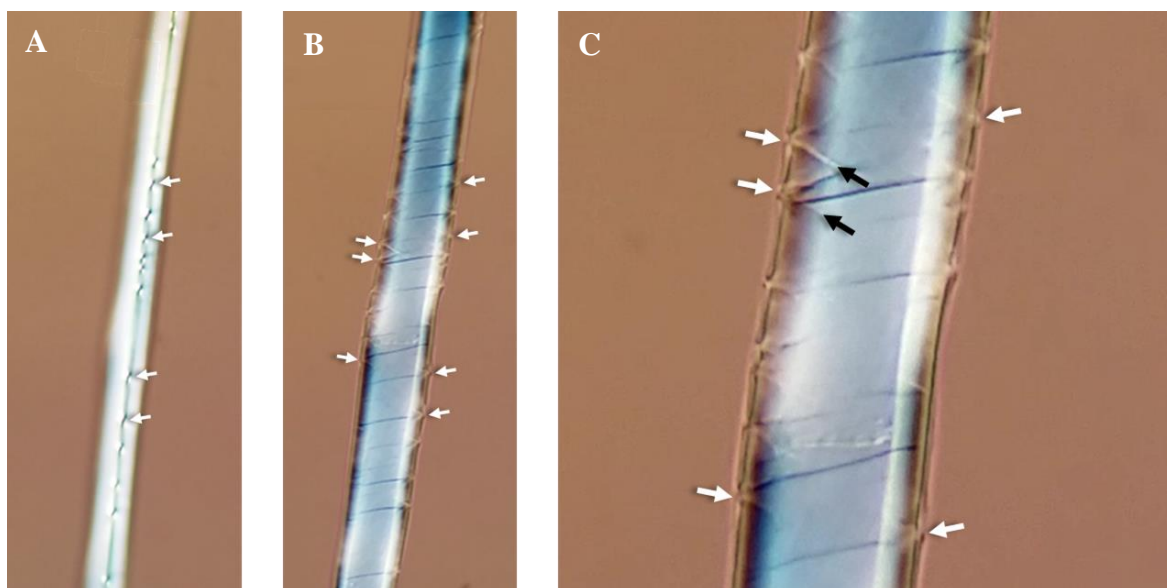
Fonte: Do autor (2022)

Moulin e Lima (2019), objetivando analisar a ocorrência natural do *slip plane* em fibras de madeira de *Eucalyptus grandis* com 28 anos de idade, quanto à sua caracterização, distribuição no caule e associação com outras características da madeira, sem considerar a variação radial, também reportaram maior valor médio da  $Q_{sp}/mm$ , nos elementos estruturais da base do tronco próximos à medula (lenho comprimido), quando comparado com o valor médio da posição externa. Investigadores relataram que a disparidade média de sua ocorrência deve-se à diferença de tensões dentro da árvore, dado que maiores esforços de compressão são encontrados na madeira da região central dos troncos, decorrentes do peso da árvore, associado com as tensões de crescimento. Adicionalmente, deve-se considerar que a madeira central do tronco é mais fraca e, conseqüentemente, mais susceptível a deformações por se tratar do lenho juvenil.

É importante ressaltar que na quantificação dos *slip planes* foi possível visualizar que em algumas fibras, características de lenho tardio, a birrefringência na microscopia de luz polarizada revelou distorções da parede próximas a pontuações, Figura 5.5, que poderiam ser confundidas com *slip planes*.

Na Figura 5.5 apresentam-se distintos perfis de segmento de fibra de madeira de teca com pontuações na parede, assinaladas com setas brancas, bem como distorções semelhantes a *slip planes*, assinalados por setas pretas.

Figura 5.5 – Fibra de madeira de *Tectona grandis* com distorções na parede, causadas por pontuações, semelhantes a *slip plane*.



Legenda: A – Perfil radial da fibra com pontuações de referência assinaladas por setas brancas; B – Perfil tangencial da fibra com pontuações da parede radial assinaladas com setas brancas; C – Perfil tangencial da fibra com distorções na parede semelhantes a *slip plane*, assinalados com setas pretas.

Fonte: Do autor (2022).

#### 5.4 Rigidez e resistência à compressão paralela às fibras

Os valores médios de rigidez à compressão paralela as fibras (MOEc) foram de 8831, 9681 e 9820 MPa, nas posições interna, intermediária e externa, respectivamente. Em termos percentuais relativos, a variação do MOEc da madeira na região interna para intermediária foi positiva, da ordem de 9,63% e da posição intermediária para a externa de 1,44%.

Os valores de resistência à compressão paralela às fibras (RC) não apresentaram o mesmo comportamento que o MOEc. Verificou-se aumento e logo diminuição da medida de resistência, RC, da madeira da posição externa para a interna, com maior valor na parte intermediária, 57 MPa, respectivamente (Tabela 5.4).

Em geral, foram determinados baixos coeficiente de variação para MOEc e RC para as três posições radiais do tronco amostradas. O valor do MOEc da parte interna (Tabela 5.4) apresentou a menor magnitude, fato que poderia estar associado à maior homogeneidade da largura dos seus anéis de crescimento. Corpos-de-prova da parte externa apresentaram marcada diferença, visual, na largura de seus anéis, portanto, número desigual dos mesmos nos corpos-de-prova externos (Figura 5.6). Entretanto, essa característica não foi quantificada neste estudo.

Na Tabela 5.4 são apresentados resultados de estatística descritiva do módulo de elasticidade em compressão (MOEc) e resistência à compressão paralela às fibras (RC) da madeira, nas posições externa, intermediária e interna da base do tronco de cinco árvores de *Tectona grandis*, aos 38 anos de idade.

Tabela 5.4 – Estatística descritiva do módulo de elasticidade e da resistência à compressão paralela às fibras da madeira de três posições radiais do tronco de *Tectona grandis*, aos 38 anos de idade.

<b>Caraterística</b>	<b>N</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Médio</b>	<b>Máximo</b>	<b>CV (%)</b>
<b>MOEc (MPa)</b>					
Externa	14	8156	9820	11931	10,79
Intermediária	15	7172	9681	11291	11,80
Interna	15	7528	8831	10257	9,58
<b>Total</b>	44	7172	9436	11932	11,58
<b>RC (MPa)</b>					
Externa	14	50	55	59	5,86
Intermediária	15	48	57	64	7,18
Interna	15	47	54	62	8,43
<b>Total</b>	44	47,37	55,54	63,84	7,44

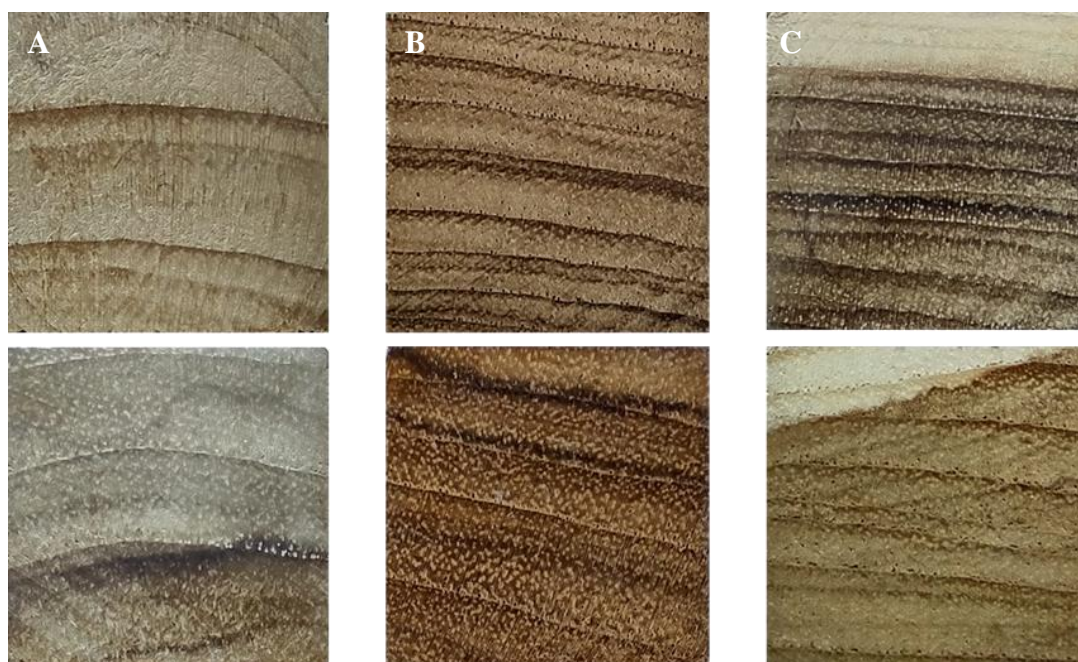
N = Número de observações; CV (%) = Coeficiente de variação, MOEc = Módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras, RC = Resistencia à compressão paralelas às fibras.

Os valores médios do MOEc registrados para as três posições avaliadas foram considerados elevados. Foram maiores que os valores médios reportados por Flórez (2012), 69021 kgf/cm<sup>2</sup> (6769 MPa); Valero, Reyes e Garay (2005), 45000 kgf/cm<sup>2</sup> (4413 MPa), em madeira de teca oriunda de árvores com 13 e 20 anos de idade, respectivamente.

A menor medida de rigidez em compressão paralela às fibras, relativa à parte interna (Tabela 5.4) que foi registrada nesta investigação, foi maior que aquelas reportadas e citadas anteriormente.

Na Figura 5.6 apresentam-se planos transversais de amostra de dois corpos-de-prova por posição radial utilizados no teste de compressão paralela as fibras. Observa-se maior homogeneidade em termos de largura dos anéis de crescimento da madeira da posição interna do caule de teca (Figura 5.6 A) em comparação com aqueles da posição intermediaria e externa.

Figura 5.6 – Planos transversais de corpos-de-prova usados no teste de compressão paralelas às fibras da madeira, nas de três posições radiais do tronco de *Tectona grandis*, aos 38 anos de idade.



Legenda: A – Região interna; B – Região intermediária; C – região externa.

Fonte: Do autor (2022).

### 5.5 Módulo de elasticidade em flexão estática e dinâmica em flexão

Verificou-se maior módulo de elasticidade em flexão estática (MOEf) para a madeira da posição intermédia, equivalente a 12363 MPa (Tabela 5.5) com ligeira tendência crescente e logo decrescente da posição interna para a externa. O mesmo comportamento foi verificado para o módulo de elasticidade dinâmico (MOEd). A medida de rigidez mensurada na flexão dinâmica apresentou valor médio correspondente a 14990 MPa. Sendo estes últimos de maior magnitude do que aqueles obtidos na máquina universal de ensaios.

Também verificou-se maior rigidez da madeira na posição intermediária por ambas técnicas de medição. O valor médio do MOEf para cada posição radial foi superior aos valores médios reportados por Bhat e Priya (2004) e Castro e Raigosa (2000), ao avaliarem madeira de teca de árvores de 17 e 21 anos de idade plantadas no Caribe e na Índia, respectivamente.

Na Tabela 5.5 apresentam-se a estatística descritiva do módulo de elasticidade obtido em flexão estática e do módulo de elasticidade dinâmico mensurado pelo teste de vibração

transversal para madeira das posições externa, intermediária e interna da base do tronco de *Tectona grandis*.

Tabela 5.5 – Estatística descritiva do módulo de elasticidade em flexão estática e módulo de elasticidade dinâmico em flexão da madeira de três posições radiais do tronco de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

<b>Caraterística</b>	<b>N</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Médio</b>	<b>Máximo</b>	<b>CV (%)</b>
<b>MOEf (MPa)</b>					
Externa	5	10805	12409	14019	9,23
Intermediária	5	12107	12599	13756	5,29
Interna	5	10918	12080	13743	11,33
<b>Total</b>	15	10805	12363	14019	8,43
<b>MOEd (MPa)</b>					
Externa	14	11180	15437	18458	14,91
Intermediária	15	11943	15657	17986	10,62
Interna	15	10791	13906	15431	8,11
<b>Total</b>	44	10791	14990	18458	12,56

N = Número de observações; CV (%) = Coeficiente de variação; MOEf = Módulo de Elasticidade em flexão estática; MOEd = Módulo de Elasticidade dinâmico.

Quanto à caracterização radial da rigidez da madeira de teca pela técnica de vibração transversal não foram encontrados registros na literatura. Porém, utilizando outra metodologia de avaliação não destrutiva, ondas acústicas, em amostras de madeira de teca de 18 anos de idade, Iwakiri *et al.* (2013) reportaram MOEd que, em geral, diferiram entre posições radiais internas e externas. Verifica-se em relação a esta investigação mesmo comportamento entre posições radiais.

Lima Júnior *et al.* (2018) empregando o mesmo tipo de equipamento de avaliação não destrutiva utilizado neste estudo, com o intuito de caracterizar a rigidez da madeira de *Eucalyptus grandis* com 10 anos de idade em diferentes alturas, reportaram pequenas diferenças do MOEd entre posições longitudinais e também entre as medidas de rigidez obtidas pela máquina universal de ensaios e pelo ultrassom.

## 5.6 Correlações entre atributos da madeira

Foram efetuadas correlações de Pearson entre os atributos da madeira estudados (Tabela 5.6) de modo a permitir a elaboração de uma matriz de correlação.

Verificou-se alta correlação, positiva e significativa, entre a resistência à compressão paralela às fibras e o módulo de elasticidade obtido na mesma direção da grã (Tabela 5.6).

Também correlação mediana significativa entre o módulo de elasticidade dinâmico e a medida de rigidez axial da madeira. De modo diferente, a medida de associação (coeficiente de correlação de Pearson) para a correlação entre o MOEd e a medida de resistência da madeira à compressão axial (RC) foi baixa ( $r= 0,43$ ), no entanto, também significativa.

Quanto às correlações dos atributos físico-ultraestruturais da madeira de teca com suas propriedades mecânicas (Tabela 5.6), a densidade básica, ângulo microfibrilar e quantidade de *slip plane* por milímetro não apresentaram correlação estatística com o módulo de elasticidade na compressão paralela as fibras, resistência na compressão paralela as fibras e o módulo de elasticidade dinâmico, respectivamente.

A correlação de Pearson entre a resistência à compressão paralela às fibras e a densidade básica foi significativa e positiva ( $r= 0,38$ ). Já o ângulo microfibrilar e a quantidade de *slip plane* apresentaram, respectivamente, correlação negativa, média alta, com a rigidez da madeira em compressão axial. Demais correlações dessa última variável ultraestrutural com os parâmetros mecânicos foram medianas a baixas.

Na Tabela 5.6 apresentam-se o resultado das correlações de Pearson entre todas as características da madeira estudadas, excetuando as correlações entre módulo de elasticidade estático e cada características da madeira estudada.

Tabela 5.6 – Matriz de correlação de Pearson entre as características da madeira da base do tronco de cinco árvores de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Característica	MOEc	RC	MOEd	Db	AMF	Qsp/mm
<b>MOEc</b>	–	–	–	–	–	–
<b>RC</b>	0,82*	–	–	–	–	–
<b>MOEd</b>	0,53*	0,43*	–	–	–	–
<b>Db</b>	0,06 <sup>ns</sup>	0,38*	0,18 <sup>ns</sup>	–	–	–
<b>AMF</b>	-0,50*	-0,19 <sup>ns</sup>	-0,45*	0,42*	–	–
<b>Qsp/mm</b>	-0,56*	-0,47*	-0,32*	-0,25 <sup>ns</sup>	0,20 <sup>ns</sup>	–

\* = Correlações significativas a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativa; MOEc = Módulo de elasticidade à compressão paralela as fibras; RC = Resistência à compressão paralela às fibras; MOEd = Módulo de elasticidade dinâmico em flexão; Db = Densidade básica; AMF = Ângulo microfibrilar; Qsp/mm = Quantidade de *slip plane* por milímetro.

Entre os atributos físico-ultraestruturais da madeira considerados nesta investigação, somente foi verificada correlação estatística significativa entre o ângulo microfibrilar e a densidade básica (Tabela 5.6), sendo a mesma média baixa positiva ( $r= 0,42$ ).

Embora não tenha sido objetivo desta investigação a realização de correlações entre os atributos de qualidade físico-ultraestruturais da madeira de teca, a detecção de correlação entre o ângulo microfibrilar e a densidade básica considera-se informação relevante do ponto de vista da consideração ou utilização de citadas variáveis para a construção de modelos de regressão com mais de um preditor, uma vez que, o conhecimento dessa relação poderia facilitar a pré-visualização de possível problema de validação de modelos de regressão múltipla, atribuível à violação do pressupostos.

Na Tabela 5.7 apresentam-se o resultado das correlações entre a medida de rigidez na flexão estática (MOEf) e a densidade básica, o ângulo microfibrilar e a quantidade de *slip planes* por milímetro, para madeira da base do tronco de cinco árvores de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade. Ressalta-se que essa análise de correlação foi efetuada separadamente devido ao pequeno tamanho da amostra, N = 15, para o ensaio de flexão estática.

Tabela 5.7 – Correlações entre o módulo de elasticidade em flexão estática e características físico-ultraestruturais da madeira do de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Correlação entre características	N	r
<b>MOEf vs Db</b>	14	0,64 *
<b>MOEf vs AMF</b>	14	- 0,61 *
<b>MOEf vs Qsp/mm</b>	15	-0,39 <sup>ns</sup>

\* = Correlação significativa a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativa; N = Número de observações; r = Coeficiente de correlação de Pearson.

Observa-se na Tabela 5.7, correlações significativas, a 5% de probabilidade de erro, positiva (0,64) entre o módulo de elasticidade em flexão estática e a densidade básica, além de correlação negativa entre a propriedade mecânica e o ângulo microfibrilar e correlação não significativa entre dita medida de rigidez e a quantidade de *slip planes* por milímetro.

Correlação positiva significativa entre o MOEf e densidade básica foi reportada por Rishter, Leithoff, Sonntag (2003) na caracterização de madeira juvenil de teca oriunda de plantações. Thulasidas e Bhat (2012) caracterizando madeira de teca de 35 anos de idade da Índia, também reportaram correlações positivas; porém, maior do que as reportadas neste estudo. Lima (1999) encontrou correlação significativa (r= 0,43) entre MOEf e AMF, porem, no estudo de 11 clones de *Eucalyptus* com oito anos de idade.

### 5.7 Relações entre propriedades mecânicas e atributos físico-ultraestruturais

Foram realizadas análises de regressão linear simples para estimar as relações de dependência da resistência à compressão paralela às Fibras das variáveis independentes

densidade básica, ângulo microfibrilar e quantidade de *slip planes* por milímetro (Tabela 5.8). As mesmas variáveis independentes foram empregadas para estimar o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de elasticidade em flexão estática (Tabela 5.9)

### 5.7.1 Módulo de elasticidade e resistência em compressão paralela às fibras em função dos atributos físico-ultraestruturais

O ângulo microfibrilar e quantidade de *slip planes* influenciaram significativamente o módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras; 24,77% e 31,06%, da variação dessa medida de rigidez, foi explicada pelas citadas variáveis ultraestruturais (Tabela 5.8).

Por outro lado, a densidade básica não foi atributo com peso estatístico para explicar a variação do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras. No entanto, influenciou significativamente a resistência da madeira à compressão paralela às fibras; 38,28% da variação dessa medida de resistência foi explicada pela propriedade física (observa-se resumo das análises de regressão simples no Anexo G). Também foi verificado que 22,10% da variação da resistência da madeira em compressão paralela, foi explicada pela quantidade de *slip plane*. Do ponto de vista estatístico o ângulo microfibrilar careceu de peso para explicar a resistência (RC) da madeira (ANEXO H).

Na Tabela 5.8 apresentam-se equações lineares ajustadas por mínimos quadrados ordinários, para estimar a variação do módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras da madeira de teca em função da densidade básica, do ângulo microfibrilar e da quantidade de *slip planes* por milímetro.

Tabela 5.8 – Equações lineares ajustadas para estimar a variação do módulo de elasticidade (MOEc) e da resistência à compressão paralela às fibras (RC) em função dos atributos físico-ultraestruturais da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

N	Equação	R <sup>2</sup> (%)	Dp (MPa)
44	MOEc = 8652,479 + 1507,295 Db	0,30 <sup>ns</sup>	1104,14
44	MOEc = 11146,634 – 113,109 AMF	24,77*	959,15
44	MOEc = 10946,063 – 676,009 Qsp/mm	31,06*	918,19
44	RC = 35,021 + 39,501 Db	38,28*	3,86
44	RC = 58,006 – 0,163 AMF	3,60 <sup>ns</sup>	4,10
44	RC = 60,359 – 2,156 Qsp/mm	22,10*	3,69

\* = Significativo pelo teste F a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativo; Dp = Desvio padrão; N = Número de observações; Db = Densidade básica; AMF = Ângulo microfibrilar; Qsp/mm = Quantidade de *slip planes* por milímetro.

Em termos de média, determinou-se (Tabela 5.8) que a cada um grau de acréscimo do ângulo microfibrilar e uma unidade na quantidade de *slip plane* por milímetro, nas fibras da madeira de teca, o módulo de elasticidade em compressão paralela as fibras diminui 113 e 676 MPa, respectivamente.

De forma geral é conhecido que quanto maior o AMF, maior a elasticidade da madeira e que o aumento das deformações (*slip plane*) na parede celular das fibras, exerce influência negativa nas propriedades mecânicas da madeira. Não obstante, a relação funcional entre o módulo de elasticidade em compressão paralela as fibras e quantidade de *slip plane* por milímetro não tem sido relatada na literatura.

### 5.7.2 Módulo de elasticidade dinâmico em flexão e módulo de elasticidade na flexão estática em função dos atributos físico-ultraestruturais

A análise de regressão linear simples permitiu verificar que incrementos no ângulo microfibrilar, bem como na quantidade de *slip plane* geram impacto negativo no módulo de elasticidade dinâmico em flexão (Tabela 5.9). Em termos de média, a cada grau de acréscimo do ângulo microfibrilar e unidade de *slip plane* nas fibras da madeira de teca, o módulo de elasticidade dinâmico diminui 155 e 674 MPa, respectivamente,

Na Tabela 5.9 apresentam-se equações lineares ajustadas para estimar a variação do módulo de elasticidade em flexão estática e dinâmica em flexão da madeira de teca em função da densidade básica, do ângulo microfibrilar e da quantidade de *slip planes* por milímetro.

Tabela 5.9 – Equações lineares ajustadas para estimar a variação do módulo de elasticidade dinâmico em flexão (MOEd) e módulo de elasticidade em flexão estática (MOEf) em função dos atributos físico-ultraestruturais da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

N	Equação	R <sup>2</sup> (%)	Dp (MPa)
44	MOEd = 10529,708 + 8586,195 Db	3,33 <sup>ns</sup>	1873,22
43	MOEd = 17411,513 – 154,982 AMF	17,16*	1647,99
44	MOEd = 16495,626 – 673,775 Q <sub>sp</sub> /mm	10,39*	1803,51
14	MOEf = 6735,173 + 9894,109 Db	40,99*	776,72
14	MOEf = 14575,704 – 147,738AMF	36,59*	816,11
15	MOEf = 13471,426 – 491,451 Q <sub>sp</sub> /mm	14,87 <sup>ns</sup>	997,87

\* = Significativo pelo teste F a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativo; Dp = Desvio padrão; N = Número de observações; Db = Densidade básica; AMF = Ângulo microfibrilar; Q<sub>sp</sub>/mm = Quantidade de *slip planes* por milímetro.

O ângulo microfibrilar e quantidade de *slip plane* influenciaram de forma significativa, o módulo de elasticidade dinâmico (ANEXOS K; L). O ângulo microfibrilar explicou 17,16% da variação da rigidez em questão, enquanto que a quantidade de *slip plane* por milímetro explicou 10,39% da sua variação. A densidade básica não foi atributo com peso estatístico (ANEXO J) para explicar a variação do módulo de elasticidade dinâmico, uma vez que apenas 3,33% da sua variação dependem da propriedade física, (Tabela 5.9).

As regressões para analisar a relação entre o módulo de elasticidade em flexão estática com a densidade básica quanto com o ângulo microfibrilar foram significativas (ANEXOS M e N respectivamente), as variáveis explicaram, 40,99% e 36,59% da variação da medida de rigidez em questão. Já para a relação funcional entre a citada medida de rigidez e a quantidade de *slip plane* por milímetros, não foi verificada significância estatística pelo modelo linear (Anexo O).

Ao observar as equações significativas da Tabela 5.9, relacionadas com a rigidez da madeira em flexão estática, é possível constatar que à medida que a densidade básica aumenta o MOEf também aumenta. Em sentido contrário, dita medida de rigidez normal diminui com o incremento do ângulo microfibrilar, por exemplo, passando de 13168 MPa a 12444 MPa para AMFs de 10 e 15°, respectivamente. De acordo com a equação, diminui 723 MPa a cada cinco graus de incremento no ângulo microfibrilar.

Quanto à baixa e não significativa relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e densidade básica da madeira de teca, não foram observados estudos na literatura para efetuar comparações. A maior parte das investigações, como as de Haines, Leban e Herbe (1996); Ilic (2003); Carreira e Candian (2008); Leite *et al.* (2012) e Carrasco *et al.* (2017) foram orientadas a verificar a relação da propriedade dinâmica com o módulo de elasticidade obtido em flexão estática. Mesmo assim, a não verificação de relação significativa entre módulo de elasticidade e densidade básica por meio de análises de regressão linear, sugere a possibilidade de outro tipo de relação entre essas variáveis, provavelmente do tipo não linear.

Cabe ressaltar que não foram encontrados estudos reportando algum tipo de relação do módulo de elasticidade dinâmico, ou ângulo microfibrilar com a quantidade de *slip plane* por milímetro, nem mesmo abordando acerca da porcentagem de variação da rigidez que poderia ser explicada por ditas características ultraestruturais.

Quanto à relação do módulo de elasticidade na flexão estática com a densidade básica, os resultados obtidos nesta investigação foram coerentes com aqueles reportados por Túllume (2000) para madeira de *Cedrela odorata L.*, mas, discrepando levemente em relação ao poder explicativo da variável física sobre a mecânica. O autor verificou que 68% da variação da

medida de rigidez da madeira de cedro acabou sendo explicada pela densidade básica, 23% mais do que a verificada nesta investigação. A relação do MOEf com a densidade aparente foi estudada por Lima (1999) que encontrou  $R^2 = 34\%$  para madeira de 11 clones de *Eucalyptus*, com oito anos de idade, plantados em quatro locais diferentes,

É importante assinalar que as relações estatísticas do ângulo microfibrilar e quantidade de *slip plane* por milímetro com os atributos mecânicos da madeira ocorrem entre magnitudes muito diferentes. Enquanto os atributos ultraestruturais referem-se a dimensões microscópicas e submicroscópicas, os atributos mecânicos referem-se a dimensões macroscópicas. Sabemos que as propriedades mecânicas, mesmo de um corpo-de-prova pequeno, aparentemente sem defeitos, são influenciadas por variações no teor de umidade, temperatura, inclinação da grã, pequenas fissuras entre outros defeitos, como relatado por Kollmann e Côté Jr (1968). Adicionalmente, aspectos como ajustes da máquina de ensaio, imperfeições geométricas do corpo-de-prova podem ocorrer, por mais rígidos que tenham sido os cuidados experimentais.

Relações estatísticas mais bem ajustadas, possivelmente seriam obtidas caso as variáveis dependentes se referissem às propriedades mecânicas da parede celular avaliadas por microscopia de força atômica, como realizadas por Soares (2009).

O modelo estatístico empregado, regressão linear simples, para estimar propriedades mecânicas da madeira de teca, apresentaram coeficientes de determinação relativamente baixos, embora significativos. Resultados mais robustos poderiam ser obtidos caso fizéssemos estimativas por análises de regressão múltiplas ou por análises de regressão não lineares. Essas análises serão motivo de avaliação futura.

### **5.8 Cargas para induzir a formação de *slip planes***

Na Tabela 5.10 apresentam-se estatística descritiva para a resistência à compressão paralela às fibras e tensão no limite de proporcionalidade. Valores médios desses atributos da madeira correspondem ao conjunto de corpos-de-prova, por posição radial, das mesmas posições de onde foram obtidos os corpos-de-prova usados para induzir a formação de *slip planes*. Os valores médios representam referência para entender a magnitude (MPa) da aplicação dos três níveis da carga sendo 30%, 55% e 80% da resistência máxima considerados para induzir a formação de *slip planes*.

Ao observar (Tabela 5.10) a resistência média da madeira da posição externa (57,50 MPa), é possível deduzir, por exemplo, que a aplicação de carga a 30% da sua resistência máxima é equivalente a 17 MPa; a 55% da sua resistência máxima 31 MPa e a 80% da sua resistência máxima 46 MPa.

Tabela 5.10 – Estatística descritiva da resistência e tensão no limite de proporcionalidade em compressão paralela às fibras da madeira de três posições radiais do tronco de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Caraterísticas	Estatísticas descritivas				
	N	Mínimo	Médio	Máximo	CV (%)
<b>RC (MPa)</b>					
Externa	18	52,28	57,50	64,18	5,54
Intermediária	18	50,45	60,02	69,43	7,24
Interna	18	49,53	57,13	67,26	7,90
<b>TLP (MPa)</b>					
Externa	18	34,38	42,29	48,20	8,61
Intermediária	18	33,84	44,58	55,11	11,67
Interna	18	33,07	40,66	52,11	12,77

N= Número de observações, CV (%)= Coeficiente de variação, RC= Resistência à compressão paralela as fibras, TLP= Tensão no limite de proporcionalidade em compressão paralelas a fibras.

Nota-se (Tabela 5.10) que a aplicação de carga a 80% da resistência máxima da madeira, em compressão paralela as fibras, da posição externa (Tabela 5.11) gera tensão maior do que a tensão no limite de proporcionalidade para a mesma posição. No entanto, as cargas utilizadas foram relativas à resistência máxima, na compressão paralela as fibras, de cada corpo-de-prova utilizado no experimento da indução de *slip planes*.

### 5.8.1 Módulo de elasticidade em flexão estática após pré-tensionamento

Após pré-tensionamento, valores médios do módulo de elasticidade em flexão estática da madeira das três posições radiais para cada porcentagem de carga, apresentaram em geral, redução da posição externa para a interna (Tabela 5.11). A rigidez apresentou mesma variação no sentido casca-medula (Tabela 5.5), ao testar amostra aleatória de corpos-de-prova não pré-tensionados. Na literatura é comum observar esse comportamento radial, casca-medula, do módulo de elasticidade em flexão estática para a maioria das espécies de madeira, sendo o mesmo considerado regra.

Quanto aos valores médios do módulo de elasticidade em flexão estática, obtidos a partir dos corpos-de-prova das três posições radiais avaliadas, após pré-tensionamento (Tabela 5.11), observou-se que o pré-tensionamento, implicou em redução dessa medida de rigidez. Os módulos de elasticidade após pré-tensionamentos em 30, 55 e 80% foram de 12404, 12070 e 11777 MPa, respectivamente.

Na Tabela 5.11 apresenta-se a estatística descritiva para o módulo de elasticidade em flexão estática da madeira das posições radiais externa, intermediária e interna, da base do tronco de *Tectona grandis* após pré-tensionamento em compressão paralela às fibras.

Tabela 5.11 – Estatística descritiva do módulo de elasticidade em flexão estática após pré-tensionamento dos corpos-de-prova em compressão axial, para madeiras de três posições radiais do tronco de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Posição radial	Carga	Módulo de Elasticidade em flexão estática (MPa)				
		N	Mínimo	Médio	Máximo	CV (%)
Externa	30%	3	12641	13254	14301	6,88
Intermediária		3	12181	13034	14021	7,11
Interna		3	10236	10925	11503	5,87
<b>Total</b>		9	10236	12404	14301	10,71
Externa	55%	3	11899	12302	12765	3,55
Intermediária		3	11318	12961	14285	11,64
Interna		3	9249	10948	12984	17,27
<b>Total</b>		9	9249	12070	14285	12,56
Externa	80%	3	10525	12165	14404	16,50
Intermediária		3	10715	12064	13396	11,11
Interna		3	9882	11101	11714	9,51
<b>Total</b>		9	9882	11777	14404	1,99

N = Número de observações; CV (%) = Coeficiente de variação.

Análises de valores médios do módulo de elasticidade em flexão estática após pré-tensionamento (Tabela 5.11) também permitiu verificar que dita medida de rigidez da madeira de teca das posições externa e intermediária exibiram maior susceptibilidade à tensão de compressão paralela as fibras que a madeira da posição interna do tronco; uma vez que foi observada sua redução com o incremento do pré-tensionamento.

A inspeção dos corpos-de-prova do teste de flexão estática permitiu constatar que mais da metade dos mesmos, da posição intermediária e externa que foram pré-tensionados a 55 e 80% da sua resistência à compressão paralela as fibras, atingiram a quebra apresentando característica de rupturas abrupta; enquanto que os corpos-de-prova pré-tensionados a 30% de sua resistência máxima não se romperam abruptamente. Koehler (1933) e Dinwoodie (1978) afirmam que esse tipo de falha de ruptura encontra-se estreitamente relacionada com os *slip planes*.

Embora tenha sido observado que a tensão preliminar em compressão paralela às fibras implica na redução do módulo de elasticidade em flexão estática da madeira, torna-se necessária a exploração estatística aprofundada dos resultados. Também, se faz necessário réplicas do experimento a partir de madeira com anéis de crescimento mais homogêneos, de porosidade difusa ou madeira de clones.

### 5.8.2 Módulo de elasticidade dinâmico em flexão antes e depois do pré-tensionamento

Valores médios do módulo de elasticidade dinâmico em flexão (MOEd) nas posições radiais dos três níveis de pré-tensionamento, apresentaram incremento à medida que proporção do pré-tensionamento aumentou (Tabela 5.12).

Na Tabela 5.12 apresenta-se parte da estatística descritiva do módulo de elasticidade dinâmico em flexão da madeira das regiões radiais externa, intermediária e interna, do tronco de *Tectona grandis* antes e depois do pré-tensionamento a 30%, 55% e 80% em compressão paralela às fibras.

Tabela 5.12 – Estatística descritiva do módulo de elasticidade dinâmico em flexão, antes e após tensionamento preliminar dos corpos-de-prova em compressão axial, para madeira de três posições radiais do tronco de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Posição radial	Carga	Módulo de Elasticidade dinâmico em flexão (MPa)					
		Pré-tensionamento			Pós-tensionamento		
		N	Média	CV (%)	N	Média	CV (%)
Externa	30%	6	15179	15,24	6	15519	16,26
Intermediária		6	15520	13,34	6	15838	12,69
Interna		6	12661	10,85	6	12846	10,90
<b>Total</b>		18	14453	15,64	18	14734	15,98
Externa	55%	6	14717	16,24	6	15058	17,31
Intermediária		6	15461	10,82	6	15726	11,16
Interna		6	13923	9,33	6	14506	8,88
<b>Total</b>		18	14700	12,57	18	15097	12,67
Externa	80%	6	15168	10,90	6	15435	11,98
Intermediária		6	15055	8,97	6	15396	8,13
Interna		6	14443	8,55	6	14565	12,05
<b>Total</b>		18	14889	9,24	18	15132	10,54

N = Número de observações; CV (%) = Coeficiente de variação.

Em termos de médias das três posições radiais dos três níveis de pré-tensionamento considerados, o módulo de elasticidade dinâmico pós-carga não apresentou comportamento de decréscimo em função do incremento do pré-tensionamento, conforme o esperado, mas, aumento seguido de decréscimo.

Na análise do efeito isolado do tratamento, antes e após o carregamento nas regiões radiais, por meio das diferenças das médias (Tabela 5.12), foi possível identificar que o aumento do pré-tensionamento gerou incremento médio do módulo de elasticidade dinâmico em flexão até a proporção de 55% (30% = 281 MPa; 55% = 397 MPa), seguindo decréscimo (80% = 243 MPa), menor do que o valor médio da diferença do módulo de elasticidade dinâmico em flexão pós-carga e pré-carga, no nível de pré-tensionamento mais baixo utilizado (Tabela 5.12). A queda da diferença da rigidez em questão, pede ser entendida pelas falhas internas na madeira causadas pela carga de 80%, que superou o limite de proporcionalidade da mesma e gerou a maior ocorrência de *slip planes* (Tabela 5.13).

É possível que o ganho na rigidez obtido pelo módulo de elasticidade dinâmico em flexão, com pré-tensionamentos inferiores ao limite elástico da madeira, tenha sido causado pela reestruturação na ultraestrutura da parede celular das fibras da madeira. Neste contexto não foram encontrados resultados de outras pesquisas na literatura pertinente e assim torna-se necessário aprofundar o estudo sobre o comportamento do módulo de elasticidade dinâmico com pré-tensionamentos paralelos as fibras.

### 5.8.3 Quantidade de *slip planes* por milímetro após aplicação das cargas

As madeiras das posições externa, intermediária e interna do tronco de teca apresentaram respectivamente 2,67, 2,53 e 2,50 *slip plane* por milímetro após pré-tensionamento de 30% da sua resistência máxima, em compressão paralela às fibras (Tabela 5.13). Para a madeira com pré-tensionamentos de 55% observou-se 3,34, 3,43 e 3,84 *slip planes* por milímetro e para o pré-tensionamento de 80%, observou 4,46, 4,26 e 3,82 *slip planes* por milímetro. Já os pré-tensionamentos em 30, 55 e 80% da resistência à compressão paralela as fibras geraram 2,57, 3,54 e 4,18 *slip planes* por milímetro (Tabela 5.13).

Constatou-se aumento da ocorrência da variável em função do incremento do pré-tensionamento. Por meio das análises de variância de dois fatores, posição x carga, (ANEXO P), verificou-se existência de diferenças significativas entre os valores médios da quantidade de *slip plane* por milímetro apenas causado pelo pré-tensionamento. Valores médios da variável ultraestrutural da madeira das três posições radiais da base do tronco de teca, diferiram entres si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro, indicando que

incrementos de tensão de 25% da resistência da madeira à compressão paralela são capazes de gerar mudanças significativas na quantidade de *slip plane* por milímetro na madeira de teca.

Na Tabela 5.13 apresenta-se a estatística descritiva e resultado da análise de variância da quantidade de *slip planes* por milímetro em função das posições radiais da madeira do tronco de *Tectona grandis* após pré-tensionamento ao 30, 55 e 80% da resistência máxima da madeira em compressão paralela às fibras.

Tabela 5.13 – Estatística descritiva e de comparação de médias da quantidade de *slip planes* por milímetro após pré-tensionamento dos corpos-de-prova em compressão axial, para madeira de três posições radiais do tronco de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Posição radial	Carga	Slip planes/mm - Pós-Carga				
		N	Mínimo	Médio	Máximo	CV (%)
Externa	30%	60	0,62	2,67	6,10	50,99
Intermediária		60	0,80	2,53	7,04	57,28
Interna		60	0,90	2,50	5,67	48,62
<b>Total</b>		180	0,62	2,57 <sup>a</sup>	7,04	52,21
Externa	55%	60	0,78	3,34	5,86	42,53
Intermediária		60	0,99	3,43	7,04	38,47
Interna		60	0,92	3,84	9,30	49,83
<b>Total</b>		180	0,78	3,54 <sup>b</sup>	9,30	44,69
Externa	80%	60	0,66	4,46	9,75	50,65
Intermediária		60	0,99	4,26	11,99	57,39
Interna		60	1,02	3,82	9,44	55,28
<b>Total</b>		180	0,66	4,18 <sup>c</sup>	11,99	54,52

N = Número de observações; CV (%) = Coeficiente de variação; médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

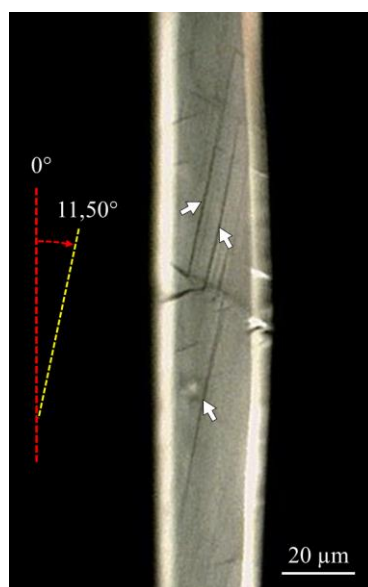
A taxa de incremento dos *slip planes* do primeiro nível (30%) de pré-tensionamento para o segundo (55%) foi de 37,74% enquanto que do intermédio para o maior (80%) 18,08%. Essa mudança abrupta na formação de *slip plane* poderia ser ocasionada pela concentração de falhas numa região específica dos corpos-de-prova de madeira prévia a seu colapso, como explicado por Dinwoodie (1974); Côté Jr. e Hanna (1983), que poderia não ter sido amostrada, bem como pelo desenvolvimento de outros tipos de colapsos nos elementos

estruturais da madeira (Figuras 5.7 e 5.8), capazes de liberar energia, antes do material atingir sua resistência máxima e influenciar a ocorrência (diminuição) de *slip plane*.

Considera-se relevante apontar que durante a quantificação dos *slip planes*, pós pré-tensionamento, foram observadas algumas fibras com fissuras em torção Z (Figura 5.7) e com aparentes colapsos axiais em torção S (Figura 5.8). Tanto fissuras como os colapsos foram observados em fibras de corpos-de-prova das três regiões radiais que foram submetidas à tensão axial a 80% da resistência máxima da madeira. As fissuras apareceram principalmente nas fibras de maior largura, apresentando ângulos, em relação ao eixo da mesma, próximos ao ângulo microfibrilar médio de cada posição radial.

Na Figura 5.7 pode-se observar uma porção da fibra de madeira da posição externa da base do tronco de *Tectona grandis* com fissuras assinaladas por setas brancas. A linha vermelha pontilhada, no lado esquerdo da figura, representa o eixo longitudinal da fibra. A linha pontilhada amarela representa a inclinação média das fissuras que foi de  $11,50^\circ$ .

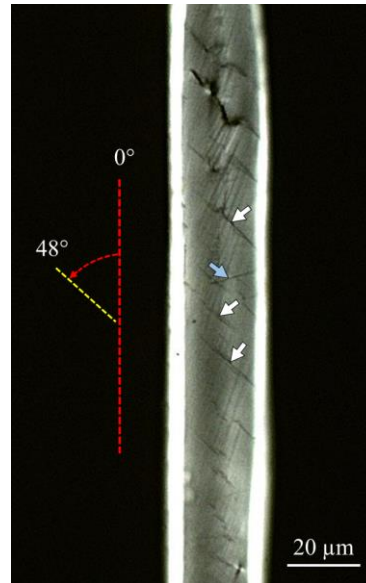
Figura 5.7 – Porção de fibra de madeira da posição externa da base do tronco de *Tectona grandis* com fissuras em torção Z.



Fonte: Do autor (2022).

Na Figura 5.8 é apresentada porção da fibra de madeira da posição interna do tronco de *Tectona grandis*, com colapsos indicados por setas brancas e *slip plane* em torção Z, indicados pela seta azul. A linha vermelha pontilhada representa o eixo longitudinal da fibra e a linha pontilhada amarela representa o ângulo médio de colapsos, que foi de  $48^\circ$ . Os colapsos apresentaram ângulos visualmente maiores que aqueles das fissuras.

Figura 5.8 – Porção de fibra de madeira da posição interna da base do tronco de *Tectona grandis* com aparentes colapsos em torção S.



Fonte: Do autor (2022).

A torção S dos aparentes colapsos da parede foi verificada por meio de minuciosa rotação da fibra durante a microscopia de luz polarizada. Foi verificado que o ângulo destes colapsos encontram-se próximos ao ângulo das microfibrilas da camadas S1 reportados por Prodhan *et al.* (1995) em estudo sobre orientação das microfibrilas de celulose e o arranjo dos microtúbulos corticais em fibras do lenho de tração de freixo japonês (*Fraxinus mandshurica* Rupr. var. *japonica* Maxim.) e também dentro do intervalo do ângulo microfibrilar da camada S3 reportado por Souza (2017) na investigação sobre distribuição da lignina e do ângulo microfibrilar na parede celular de *Eucalyptus grandis*.

As observações anteriores merecem suma atenção, uma vez que poderiam ser úteis para formular e fundamentar hipóteses para futuras investigações com o potencial de gerar conhecimentos que podem facilitar a caracterização da parede dos elementos estruturais da madeira e ajudar a compreender melhor o comportamento ultraestrutural de esse material ante solicitações mecânicas.

## 6 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos nesta investigação conclui-se que para a madeira de *Tectona grandis*, aos 38 anos de idade:

- a) A densidade básica, o ângulo microfibrilar e a quantidade de *slip planes* por milímetro, diminuem da parte interna do caule para a externa (sentido medula-casca);
- b) Os valores médios da resistência à compressão paralela às fibras, módulo de elasticidade em flexão estática, módulo de elasticidade dinâmico em flexão, módulo de elasticidade à compressão paralela as fibras, densidade básica, ângulo microfibrilar e quantidade de *slip planes* foram, respectivamente, 55,54 MPa, 12366 MPa, 14990 MPa, 9436 MPa, 0,52 g.cm<sup>-3</sup>, 15,13° e 2,23 por milímetro;
- c) Apenas duas das três características físico-ultraestruturais influenciaram significativamente a rigidez em distintas solicitações. Características ultraestruturais influenciaram o módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras e o módulo dinâmico em flexão, de forma negativa; a densidade básica e ângulo microfibrilar, respectivamente, influenciaram a rigidez em flexão estática, de forma positiva e negativa; enquanto o atributo físico e a quantidade de *slip planes* por milímetro influenciaram a resistência à compressão paralela às fibras, de forma positiva e negativa, respectivamente;
- d) O aumento da intensidade de pré-tensionamento compressivo ocasionou aumento na quantidade de *slip planes*; tanto o pré-tensionamento como os *slip planes* influenciaram negativamente a rigidez, tanto em flexão estática como em flexão dinâmica.

## REFERÊNCIAS

- AGUILAR, J.; GUZOWSKI, E. Materiales y materias primas. Madera. In: **Materiales y materias primas**: Madera. [S. l.: s. n.]. 2011.
- ALMÉRAS, T. *et al.* Contribution of cellulose to the moisture-dependent elastic behaviour of wood. **Composites Science and Technology**, v. 138, p. 151–160, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM **D143-14**: Standard methods of testing small clear specimens of timber. Filadelfia, Estados Unidos da América, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM **E1876-01**: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941-02**: Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- BALLARINI, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedades de resistência de madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 27, n. 3, p. 371-380, 2003.
- BARNETT, J. R.; BONHAM, V. A. Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres. **Biological reviews**, v. 79, n. 2, p. 461-472, 2004.
- BAUMGART, F. Stiffness - an unknown world of mechanical science? **Injury**, v. 31, n. 2, p. S-B14-S-B23, 2000.
- BENDTSEN, B. A.; J. SENFT, J. Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cottonwood and loblolly pine. **Wood and Fibre Science**, v. 18, n. 1, p. 23–38, 1968.
- BHAT, K. M.; PRIYA, P. B. Influence of provenance variation on wood properties of teak from the western ghat region in india. **IAWA Journal**, Utrecht, v. 25, n. 3, p. 273-282, 2004.
- BHAT, K. M.; PRIYA, P. B.; RUGMINI, P. Characterisation of juvenile wood in teak. **Wood Science and Technology**, v. 34, n. 6, p. 517-532, 2001.
- BIENFAIT, J. L. Relation of the manner of failure to the structure of wood under compression parallel to the grain. **Journal of Agricultural Research**, v. 33, n. 2, 1926.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Van Reinhold Company, 1982.
- BRANCHERIAU, L. *et al.* Key signal and wood anatomy parameters related to the acoustic quality of wood for xylophone-type percussion instruments. **Journal of Wood Science**, v. 52, p. 270-274, 2006.
- CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A. A. Utilização da madeira em construções rurais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 1, p. 71–77, 1997.

CARRASCO, E. V. M. *et al.* Avaliação das características mecânicas da madeira por meio de excitação por impulso. **Revista Matéria**, v. 22, 2017.

CARREIRA, M. R. *et al.* Bending stiffness evaluation of Teca and Guajará lumber through tests of transverse and longitudinal vibration. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 34, n. 1, p. 27-32, 2012.

CARREIRA, M. R.; CANDIAN, M. Teste de um equipamento para classificação de peças estruturais de madeira pela técnica da vibração transversal. **Ciências Exatas e da Terra**, v. 29, n. 1, p. 3-14, 2008.

CASTRO, F.; RAIGOSA, J. Crecimiento y propiedades físico mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis*) de 17 años de edad en San Joaquín de Abangares Costa Rica. **Agronomía Costarricense**, San José, v. 24, n. 2, p. 7-23, 2000.

CAVE, I. D. The anisotropic elasticity of the plant cell wall. **Wood Science and Technology**, New York, v. 2, p. 268-278, 1968.

CONW, D. J.; BALL, R. D. Wood densitometry of 10 *Pinus radiata* families at seven contrasting sites influence of tree age, site, and genotype. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 31, n. 1, p. 88-100, 2001.

CÔTÉ Jr, W. A. Wood ultrastructure in relation to chemical composition. In: **The Structure, Biosynthesis, and Degradation of Wood**. Springer, Boston, MA, USA, 1977, p. 1-44.

CÔTÉ Jr, W. A.; HANNA, R. B. Ultrastructural characteristics of wood fracture surfaces. **Wood and Fiber Science**, v. 15, n. 2, 1983, p. 135-163.

COUTO, A. M. *et al.* Amostragens longitudinais alternativas para a determinação da densidade básica em clones de *Eucalyptus sp.* **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 2, p. 184-193, 2012.

COWN, D. J.; HEBERT, J.; BALL, R. Modelling *Pinus radiata* lumber characteristics. Part 1: Mechanical properties of small clears. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 29, n. 2, p. 203-213, 1999.

DINWOODIE, J. Induction of cell wall dislocations (slip planes) during the preparation of microscope sections of wood. **Nature**, v. 212, p. 525-527, 1966.

DINWOODIE, J. M. Failure in timber part 3: The effect of longitudinal compression on some mechanical properties. **Wood Science and Technology**, v. 12, p. 271-285, 1978.

DINWOODIE, J. M. Failure in Timber Part II: The angle of shear through the cell wall during longitudinal compression stressing, **Wood Science and Technology**, v. 8, n. 1, p. 56-67, 1974.

DINWOODIE, J. M. Failure in timber. Part 1: Microscopic changes in cell-wall structure associated with compression failure. **Journal of the Institute of Wood Science**, v. 4, n. 3, p. 37-53, 1968.

DONALDSON, L. A. Effect of physiological age and site on microfibril angle in *Pinus radiata*. **IAWA Journal**, v. 17, n. 4, p. 421-429, 1996.

DONALDSON, L. A. Within-and between-tree variation in microfibril angle in *Pinus radiata*. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 22, n. 1, p. 77-86, 1992.

DONALDSON, L. A. Wood cell wall ultrastructure the key to understanding wood properties and behaviour. **IAWA Journal**, v. 40, n. 4, p. 645-672, 2019.

DONALDSON, L. Microfibril angle: measurement, variation and relationships – a review. **IAWA Journal**, v. 29, n. 4, p. 345-386, 2008.

DONALDSON, L.; XU, P. Microfibril orientation across the secondary cell wall of *Radiata* pine tracheids. **Trees**, v. 19, p. 644-653, 2005.

DURÃES, A. F. S. *et al.* Optimization of cellulose nanofibril production under enzymatic pretreatment and evaluation of dislocations in plant fibers. **Fibers and Polymers**, v. 22, n. 7, 1810-1821, 2021.

ESTEBAN, G. L. *et al.* **La Madera y su Tecnología**. Coedición FUCOVASA, Mundiprensa y AITIM: Madrid, España, 2002, p. 336.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood Chemistry, Ultrastructure and Reactions**, 1st ed., Walter de Gruyter: Berlin, 1989.

FERREIRA, M.; KAGEYAMA, P. Y. Melhoramento genético da densidade de eucalipto. Boletim Técnico – **IPEF**, v. 6, n. 20, p. A1 – A15, 1978.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Glulam beams reinforced with FRP externally-bonded: theoretical and experimental evaluation. **Materials and Structures**, v. 44, n 8, p. 1431-1440, 2011.

FLOREZ, J. B. **Caracterização tecnológica da madeira jovem de teca (*Tectona grandis* L. f)**. 2012. 85 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

FOELKEL, C. E. B. *et al.* Variabilidade radial da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Silvicultura**, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 782-91, 1983.

FRANKLIN, G. L. Preparation of thin section of synthetic resins and Wood-resin composites, and a new macerating method for Wood. **Nature**, London, v. 155, n. 3924, p. 51-51, 1945.

GONÇALVES, M. P. M. *et al.* Variação radial da densidade básica e comprimento das fibras da madeira de *Tectona grandis* L. **Floresta e ambiente**, v. 14, n. 1, p. 70-75, 2007.

HAINES, D. W.; LEBAN, J. M.; HERBE, C. Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. **Wood Science Technology**, v. 30, n. 4, p. 253-263, 1996.

HARRIS, P. J. Primary and secondary plant cell walls: A comparative overview. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 36, n. 1, p. 36-53, 2006.

HARTLER, N. Misaligned zones in cellulosic fibres. Part 1: Survey. **Norsk Skogsind**, v. 23, n. 4, p. 114-120, 1969.

HEIN, P. R. G. *et al.* Estimativa da resistência e da elasticidade à compressão paralela às fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* usando a espectroscopia no infravermelho próximo. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 82, p. 119-129, 2009.

HEIN, P. R. G. *et al.* Resonance of scantlings indicates the stiffness even of small specimens of *Eucalyptus* from plantations. **Wood Science and Technology**, v. 46, p. 621-635, 2012.

HOFFMEYER, P. Non-linear creep caused by slip plane formation. **Wood Science and Technology**, v. 27, p. 321-335, 1993.

IAWA COMMITTEE. **IAWA list of microscopic features for hardwood identification**. In: WHEELER, E. A.; BAAS, P.; GASSON, P.E. (Ed.). IAWA Bulletin n. s., v. 10, n. 3, p. 219-332, 1989.

ILIC, J. Dynamic MOE of 55 species using small wood beams. **Holz Roh Werkst**, v. 61, p. 167-172, 2003.

IWAKIRI, S. *et al.* Estimativa do módulo de elasticidade dinâmico nas diferentes posições do tronco das árvores de *Tectona grandis* utilizando método de ondas acústicas. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 100, p. 523-532, 2013.

KOEHLER, A. Causes of Brashness in Wood. USDA For. Serv. Technical Bulletin No. 342. **United States Department of Agriculture**, Washington DC, 1933.

KOLLMANN F. F. P.; CÔTÉ W. A Jr. Principles of wood science and technology. I. Solid wood. **Springer, Berlin Heidelberg**, 1968.

LANGER, A. M. Approaches and constraints to identification and quantitation of asbestos fibers. **Environmental Health Perspectives**, v. 9, p. 133-136, 1974.

LEITE, E. R. S. *et al.* Estimation of the dynamic elastic properties of wood from *Copaifera langsdorffii* Desf using resonance analysis. **Cerne**, v. 18, n. 1, p. 41-47, 2012.

LIMA JÚNIOR, M. P. *et al.* Mechanical properties evaluation of *Eucalyptus grandis* wood at three different heights by impulse excitation technique (IET). **Bioresources**, vol. 13, n. 2, p. 3377-3385, 2018.

LIMA, I. L. de; FLORSHEIM S. M. B.; LONGUI, E., L. Influência do espaçamento em algumas propriedades físicas da madeira de *Tectona grandis* Linn. **Cerne**, v. 15, n. 2, p. 244-250, 2009.

LIMA, I. L. de; FLORSHEIM, S. B.; LONGUI, E. L. Influência do espaçamento em algumas propriedades físicas da madeira de *Tectona grandis* Linn. **Cerne**, v. 15, n. 2, p. 244-250, 2009.

- LIMA, J. T. **Clonal variation in the solid wood properties of Eucalyptus**. 1999. 276 p. Tese (Doutorado em Ciências e Tecnologia da Madeira) - University of Wales, Bangor, 1999.
- LIMA, J. T.; BREESE, M. C.; CAHALAN, C. M. Variation in microfibril angle in *Eucalyptus* clones. **Holzforschung**, Berlin, v. 58, n. 2, p. 160-166, 2004.
- LIMA, J. T.; RIBEIRO, A. O.; NARCISO, C. R. P. Microfibril angle of *Eucalyptus grandis* wood in relation to the cambial age. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 16, n. 4, p. 487-494, 2014.
- LIN, C. H. *et al.* Effects of ring characteristics on the compressive strength and dynamic modulus of elasticity of seven softwood species. **Holzforschung**, Berlin, v. 61, n. 4, p. 414-418, 2007.
- MADSEN, B.; NIELSEN, L. F. **Structural behaviour of timber**. Timber Engineering Ltd., North Vancouver. British Columbia, Canada, 1992, p. 405.
- MELO, R. R. *et al.* Caracterização física e mecânica da madeira de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 1, p. 67-73, 2010.
- MELO, R. R. *et al.* Estudo da variação radial da densidade básica de sete madeiras do semi-árido. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 4, n. 7, p. 1-8, 2006.
- MEYLAN, B. A.; PROBINE, M. C. Microfibril angle as a parameter in timber quality assessment. **Forest Products Journal**, v. 19, n. 4, p. 30-33, 1969.
- MINAS GERAIS (MG), Prefeitura Municipal de Belo Oriente. Geografia. Portal do contribuinte, 2011. Disponível em: <<https://www.beloorientemg.gov.br/detalhe-da-materia/info/geografia/6512>>. Acesso em: 01 set. 2021.
- MONTEIRO, T. C. *et al.* Efeito dos elementos anatômicos da madeira na secagem das toras de *Eucalyptus* e *Corymbia*. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 115, p. 493-505, 2017.
- MOULIN, J. C. **Análise da ocorrência natural de slip planes na parede celular de fibras da madeira de Eucalyptus grandis**. 2017. 47 p. Teses (Doutorado em Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.
- MOULIN, J. C.; LIMA, J. T. Quantification of slip planes in the stem wood of *Eucalyptus grandis*. **Holzforschung**, v. 73, n. 3, p. 269-275, 2019.
- MÜLLER, M. *et al.* Direct observation of microfibril arrangement in a single native cellulose fibre by microbeam smallangle X-ray scattering. **Macromolecules** v. 31, n. 12, p. 3953-3957, 1998.
- NUGROHO, W. D. *et al.* Radial variations in the anatomical characteristics and density of the wood of *Acacia mangium* of five different provenances in Indonesia. **Journal of Wood Science**, v. 58, p. 185-194, 2012.
- NYHOLM, K. *et al.* Dislocations in pulp fibres—their origin, characteristics and importance—a review. **Nordic Pulp & Paper Research Journal**, v. 16, n. 4, p. 376-384, 2001.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**: structure, identification, properties, and uses of the commercial woods of the United States and Canada. 4th ed. New York, NY, (USA): McGraw-Hill Book Company; 1980.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C.; BROWN, H. P. **Textbook of wood technology**. Vol. I. Structure, identification, uses, and properties of the commercial woods of the United States., n. 2nd ed., 1964.

PARKER, H.; AMBROSE, J. **Diseño simplificado de estructuras de madera**. 2a. ed. Editorial Limusa-Wiley; 2005, 338 p.

PRESTON, R. D. The Organization of the Cell Wall of the Conifer Tracheid. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B-Biological Sciences**, v. 224, n. 511, p. 131-174, 1934.

PRODHAN, A. K. M. A. *et al.* Orientation of microfibrils and microtubules in developing tension-wood fibres of Japanese ash (*Fraxinus mandshurica* var. *japonica*). **Planta**, v. 196, p. 577-585, 1995.

RAMOS, L. M. A. *et al.* Variação radial dos caracteres anatômicos da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden e idade de transição entre lenho juvenil e adulto. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 92, p. 411-418, 2011.

RICHTER, H. G.; BURGER, L. M. **Anatomia da madeira**. 2 ed. Curitiba: UFPR, 1978, 78 p.

RICHTER, H. G.; LEITHOFF, H.; SONNTAG, U. Characterisation and extension of juvenile wood in plantation grown teak (*Tectona grandis* L.f.) from Ghana. In: **Proceedings of the international conference on quality timber products of teak from sustainable forest management**. Peechi, India, p. 266-272, 2003.

ROBINSON, P.; DAVIDSON, M. **Introduction to Polarized Light Microscopy**, 2015. Disponível em: <<http://www.microscopyu.com/>>. Acesso: 02 feb. 2021.

ROBINSON, W. The microscopical features of mechanical strains in timber and the bearing of these on the structure of the cell-wall in plants. **Ph. Trans. Royal Soc**, p. 49-82, 1920.

ROWELL, R. M. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**, 1st ed., CRC Press: Madison, 2005.

RUELLE, J. Morphology, anatomy and ultrastructure of reaction wood. In: **The biology of reaction wood**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. p. 13-35.

SARÉN, M. *et al.* Effect of growth rate on mean microfibril angle and cross-sectional shape of tracheids of Norway spruce. **Trees**, v. 18, p. 354-362, 2004.

SCANAVACA JUNIOR, L.; GARCIA, J. N. Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v. 65, p. 120-129, 2004.

SERPA, P. N. *et al.* Avaliação de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 723-733, 2003.

SOARES, B. C. D. **Nanoindentações na parede celular: Relações entre propriedades nanomecânicas e o fendilhamento na madeira de *Eucalyptus grandis***. 2019. 65 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

SOUZA, *et al.* Delimitação estatística dos lenhos juvenil e adulto de *Eucalyptus* e *Corymbia*. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 116, p. 611-618, 2017.

SOUZA, M. T. **Distribuição espacial da lignina e do ângulo microfibrilar na parede celular de *Eucalyptus grandis***. 2017. 52 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

SOUZA, N. C. M. de; LIMA, J. T.; SOARES, B. C. D. Application of X-ray diffraction to assess the microfibril angle of green and dry *Eucalyptus grandis* wood. **Trees**, v. 36, p. 191-197, 2022.

TARGA, L. A.; BALLARIN, A. W.; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 291-299, 2005.

THULASIDAS, P. K.; BHAT, K. M. Mechanical properties and wood structure characteristics of 35-year old home-garden teak from wet and dry localities of Kerala, India in comparison with plantation teak. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 9, p. 23-32, 2012.

THYGESEN, L. G.; ASGHARIPOUR, M. R. The effects of growth and storage conditions on dislocations in hemp fibres. **Journal of Materials Science**, v. 43, n. 10, p. 3670-3673, 2008.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica em estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus globulus*, *E. pellita* e *E.acmenioides*. **IPEF**, Piracicaba, n. 36, p. 35-42, 1987.

TULLUME, C. M. C. **Caraterísticas anatómicas y propiedades físico-mecánicas del cedro (*Cedrela odorata* L.) proveniente de Satipo**. 2000. 79 p. Tese (Engenharia Florestal) - Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, 2000.

VAINIO, U. S. *et al.* Variation of microfibril angle between four provenances of sitka spruce (*Picea sitchensis* [Bong.] Carr.). **Plant Biology**, v. 4, n. 1, p. 27-33. 2002.

VALERO, S. W.; REYES, E. C.; GARAY, D. A. Estudio de las propiedades físico-mecánicas de la especie *Tectona grandis*, de 20 años de edad, provenientes de las plantaciones de la unidad experimental de la reserva forestal Ticoporo, Estado Barinas. **Revista Forestal Venezolana**, Caracas, v. 49, n. 1, p. 61-73, 2005.

VITAL, **Benedito Rocha**. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa, MG: SIF, v. 501, 1984.

WALKER, J. C. F.; BUTTERFIELD, B. G. The Importance of microfibril angle for the processing industries. **New Zealand Forestry**, v. 40, n. 4, p. 34-40, 1996.

WARDROP, A. B.; PRESTON, R. D. Organisation of the cell walls of tracheids and wood fibres. **Nature**, v. 160, p. 911-913, 1947.

WILKINS, A. P.; ALEXIOU, P. N. Relationship between fiber cell-wall deformations and longitudinal growth strain: a research note. **Wood and Fiber Science**, v. 23, n. 3 p. 358-362, 1991.

YANG, J. L.; EVANS, R. Prediction of MOE of Eucalyptus wood from microfibril angle and density. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.61, p.449- 452, 2003.

ZHANG, S. Y. Wood quality attributes and their impacts on wood utilization. *In: XII World Forestry Congress*, 2003, Québec City, Canada. **Anais [...]**. Québec City, Canada: 0674-B1, 2003.

ZOBEL, B. J.; BUIJTENEN, J. P. van. Wood variation and wood properties. *In: Wood variation*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1989. 361 p.

## ANEXO

ANEXO A – Análise de variância da densidade básica (Db) em função das posições radiais da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Fator de variação	Db (g.cm <sup>-3</sup> )				
	gl	SQ	QM	F	P
Posição radial	2	0,018	0,009	7,719	0,001*
Resíduo	41	0,049	0,001		
Total	43	0,067			
Nº de observações =	44	Média geral =	0,519	CV% =	0,660

\* = Significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativo.

ANEXO B – Análise de variância do ângulo microfibrilar (AMF) em função das posições radiais da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Fator de variação	AMF (°)				
	gl	SQ	QM	F	P
Posição radial	2	708,903	354,451	50,916	0,000*
Resíduo	41	285,420	6,961		
Total	43	994,324			
Nº de observações =	44	Média geral =	15,128	CV% =	17,44

\* = Significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativo.

ANEXO C – Análise de variância da quantidade de *slip planes* por milímetro (Qsp/mm) em função das posições radiais da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Fator de variação	Qsp/mm				
	gl	SQ	QM	F	P
Posição radial	2	28,588	14,294	7,682	0,000*
Resíduo	447	831,747	1,860		
Total	449	860,336			
Nº de observações =	450	Média geral =	2,222	CV% =	61,36

\* = Significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativo.

ANEXO D – Ajuste do modelo da regressão linear simples para o módulo de elasticidade em compressão paralelas às fibras (MOEc) em função da densidade básica (Db) da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Ajustado	Teste do modelo geral MOEc (MPa)			
				F	gl 1	gl 2	P
1	0,055	0,0030	-0,021	0,128	1	42	0,722 <sup>ns</sup>
Coeficientes do modelo				Prova Shapiro - Wilk			
Preditor	Estimador	EE	T	P	Estatístico		P
Constante	8652,479	2190,962	3,949	0,001*	0,981		0,672 <sup>ns</sup>
Db	1507,295	4205,439	0,358	0,722 <sup>ns</sup>			

\* = Significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativo.

ANEXO E – Ajuste do modelo da regressão linear simples para o módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras (MOEc) em função do ângulo microfibrilar (AMF) da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Ajustada	Teste do modelo geral MOEc (MPa)			
				F	gl 1	gl 2	P
1	0,498	0,2477	0,230	13,828	1	42	0,001*
Coeficientes do modelo				Prova Shapiro - Wilk			
Preditor	Estimador	EE	T	P	Estatístico		P
Constante	11146,634	482,344	23,109	0,001*	0,969		0,279 <sup>ns</sup>
AMF	-113,109	30,417	-3,719	0,001*			

\* = Significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativo.

ANEXO F – Ajuste do modelo da regressão linear simples para o módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras (MOEc) em função da quantidade de *slip planes* por milímetro (Qsp/mm) da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Ajustada	Teste do modelo geral MOEc (MPa)			
				F	gl 1	gl 2	P
1	0,557	0,3106	0,294	18,919	1	42	0,001*
Coeficientes do modelo				Prova Shapiro - Wilk			
Preditor	Estimador	EE	T	P	Estatístico		P
Constante	10946,063	373,857	29,279	0,001*	0,952		0,063 <sup>ns</sup>
Qsp/mm	-676,009	155,417	-4,350	0,001*			

\* = Significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativo.

ANEXO G – Ajuste do modelo da regressão linear simples para a resistência em compressão paralelas as fibras (RC) em função da densidade básica (Db) da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Ajustada	Teste do modelo geral RC (MPa)			
				F	gl 1	gl 2	P
1	0,383	0,1465	0,126	7,212	1	42	0,010*
Coeficientes do modelo				Prova Shapiro - Wilk			
Preditor	Estimador	EE	T	P	Estatístico		P
Constante	35,021	7,663	4,570	0,001*	0,987		0,885 <sup>ns</sup>
Db	39,501	14,710	2,685	0,010*			

\* = Significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativo.

ANEXO H – Ajuste do modelo da regressão linear simples para a resistência em compressão paralelas as fibras (RC) em função da ângulo microfibrilar (AMF) da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Ajustada	Teste do modelo geral RC (MPa)			
				F	gl 1	gl 2	P
1	0,190	0,036	0,013	1,567	1	42	0,218 <sup>ns</sup>
Coeficientes do modelo				Prova Shapiro - Wilk			
Preditor	Estimador	EE	T	P	Estatístico		P
Constante	58,006	2,064	28,102	0,001*	0,979		0,612 <sup>ns</sup>
AMF	-0,163	0,130	-1,252	0,218			

\* = Significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativo.

ANEXO I – Ajuste do modelo da regressão linear simples para a resistência em compressão paralelas as fibras (RC) em função da quantidade de *slip planes* por milímetro (Qsp/mm) da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Ajustada	Teste do modelo geral RC (MPa)			
				F	gl 1	gl 2	P
1	0,470	0,2210	0,202	11,915	1	42	0,001*
Coeficientes do modelo				Prova Shapiro - Wilk			
Preditor	Estimador	EE	T	P	Estatístico		P
Constante	60,359	1,502	40,177	0,001*	0,984		0,777 <sup>ns</sup>
Qsp/mm	-2,156	0,625	-3,452	0,001*			

\* = Significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativo.

ANEXO J – Ajuste do modelo da regressão linear simples para o módulo de elasticidade dinâmico (MOEd) em função da densidade básica (Db) da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Ajustada	Teste do modelo geral MOEd (MPa)			
				F	gl 1	gl 2	P
1	0,1826	0,0333	0,0103	1,448	1	42	0,236 <sup>ns</sup>
Coeficientes do modelo				Prova Shapiro - Wilk			
Preditor	Estimador	EE	T	P	Estatístico		P
Constante	10529,708	3717,044	2,833	0,007*	0,982		0,709 <sup>ns</sup>
Db	8586,195	7134,674	1,203	0,236 <sup>ns</sup>			

\* = Significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativo.

ANEXO K – Ajuste do modelo da regressão linear simples para o módulo de elasticidade dinâmico (MOEd) em função do ângulo microfibrilar (AMF) da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Ajustada	Teste do modelo geral MOEd (MPa)			
				F	gl 1	gl 2	P
1	0,4142	0,1716	0,1514	8,493	1	41	0,006*
Coeficientes do modelo				Prova Shapiro - Wilk			
Preditor	Estimador	EE	T	P	Estatístico		P
Constante	17411,513	836,074	20,825	0,001*	0,951		0,064 <sup>ns</sup>
AMF	-154,982	53,181	-2,914	0,006*			

\* = Significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativo.

ANEXO L – Ajuste do modelo da regressão linear simples para o módulo de elasticidade dinâmico (MOEd) em função da quantidade de *slip planes* por milímetro (Qsp/mm) da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Ajustada	Teste do modelo geral MOEd (MPa)			
				F	gl 1	gl 2	P
1	0,3224	0,1039	0,0826	4,871	1	42	0,033*
Coeficientes do modelo				Prova Shapiro - Wilk			
Preditor	Estimador	EE	T	P	Estatístico		P
Constante	16495,626	734,328	22,464	0,001*	0,977		0,499 <sup>ns</sup>
Qsp/mm	-673,775	305,269	-2,207	0,033*			

\* = Significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativo.

ANEXO M – Ajuste do modelo da regressão linear simples para o módulo de elasticidade em flexão estática (MOEf) em função da densidade básica (Db) da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Ajustada	Teste do modelo geral MOEf (MPa)			
				F	gl 1	gl 2	P
1	0,6402	0,4099	0,3607	8,335	1	12	0,014 *
Coeficientes do modelo				Prova Shapiro - Wilk			
Preditor	Estimador	EE	T	P	Estatístico		P
Constante	6735,173	1919,567	3,509	0,004 *	0,933		0,340 <sup>ns</sup>
Db	9894,109	3426,925	2,887	0,014 *			

\* = Significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativo.

ANEXO N – Ajuste do modelo da regressão linear simples para o módulo de elasticidade em flexão estática (MOEf) em função do ângulo microfibrilar (AMf) da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Ajustada	Teste do modelo geral MOEf (MPa)			
				F	gl 1	gl 2	P
1	0,6049	0,3659	0.3130	6,9239	1	12	0,022*
Coeficientes do modelo				Prova Shapiro - Wilk			
Preditor	Estimador	EE	T	P	Estatístico		P
Constante	14575,704	827,846	17,107	0,001*	0,924		0.251 <sup>ns</sup>
AMF	-147,738	56,146	-2,631	0,022*			

\* = Significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativo.

ANEXO O – Ajuste do modelo da regressão linear simples para o módulo de elasticidade em flexão estática (MOEf) em função da quantidade de *slip planes* por milímetro (*Qsp/mm*) da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Ajustada	Teste do modelo geral MOEf (MPa)			
				F	gl 1	gl 2	P
1	0,3856	0,1487	0.0832	2,271	1	13	0,156 <sup>ns</sup>
Coeficientes do modelo				Prova Shapiro - Wilk			
Preditor	Estimador	EE	T	P	Estatístico		P
Constante	13473,426	779,413	17,284	0,001*	0,942		0,405 <sup>ns</sup>
<i>Qsp/mm</i>	-491,451	326,159	-1,507	0,156 <sup>ns</sup>			

\* = Significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativo.

ANEXO P – Análise de variância para a quantidade de *slip planes* por milímetro (*Qsp/mm*) em função da carga (C) e posição radial (PR) da madeira de *Tectona grandis* aos 38 anos de idade.

Fator de variação	<i>Qsp/mm</i>				
	gl	SQ	QM	F	P
Carga (C)	2	237,5887	118,7943	37,656	0,0000 *
Procissão Radial (PR)	2	1,011	0,505	0,160	0,8520 <sup>ns</sup>
C x PR	4	21,781	5,445	1,726	0,1428 <sup>ns</sup>
Resíduo	531	1675,181	3,154		
N° de observações =	540	Média geral =	3,4274	CV% =	51,82

\* = Significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativo.