



ÁUREO APARECIDO ABREU JÚNIOR

**CARACTERIZAÇÃO MACRO E MICROESTRUTURAL DO
LENHO DE TRONCOS DE ÁRVORES ERETAS E INCLINADAS
DE *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson**

LAVRAS – MG

2021

ÁUREO APARECIDO ABREU JÚNIOR

**CARACTERIZAÇÃO MACRO E MICROESTRUTURAL DO LENHO DE TRONCOS
DE ÁRVORES ERETAS E INCLINADAS DE *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill &
L.A.S. Johnson**

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

Prof. Dr. José Tarcísio Lima
Orientador

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva
Coorientador

LAVRAS – MG

2021

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

Abreu Júnior, Áureo Aparecido.

Caracterização macro e microestrutural do lenho de troncos de árvores eretas e inclinadas de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson / Áureo Aparecido Abreu Júnior. - 2021. 88 p. : il.

Orientador(a): José Tarcísio Lima.

Coorientador(a): José Reinaldo Moreira da Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2021. Bibliografia.

1. lenho de tração. 2. microtomografia computadorizada. 3. deformação residual longitudinal. I. Lima, José Tarcísio. II. da Silva, José Reinaldo Moreira. III. Título.

ÁUREO APARECIDO ABREU JÚNIOR

**CARACTERIZAÇÃO MACRO E MICROESTRUTURAL DO LENHO DE TRONCOS
DE ÁRVORES ERETAS E INCLINADAS DE *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill &
L.A.S. Johnson**

**MACRO AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF WOOD FROM
STRAIGHT AND LEANED STEM TREES OF *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill &
L.A.S. Johnson**

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

APROVADA em 29 de março de 2021.

Dr. José Tarcísio Lima – UFLA

Dr. José Reinaldo Moreira da Silva – UFLA

Dra. Bruna Roque Ugulino de Oliveira FPIInnovations – Canadá

Dr. Mario Tommasiello Filho USP – ESALQ

Dra. Rosilei Aparecida Garcia CRMR – Canadá

Prof. Dr. José Tarcísio Lima
Orientador

LAVRAS – MG

2021

AGRADECIMENTOS

À Deus, minha família, e namorada, Yasmim, por serem minha fortaleza e sempre estarem me dando todo apoio necessário.

Ao Programa de Ciência e Tecnologia da Madeira (PPGCTM) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Programa Erasmus Mundus (EBW+) pela oportunidade de realização do Doutorado no Brasil, parte sanduíche na Suécia e apoio financeiro.

Aos professores do PPGCTM pelos ensinamentos e amizade necessários ao longo desse projeto. Meus sinceros agradecimentos ao professor Dr. José Tarcísio Lima por ter sempre incentivado a buscar o melhor de mim para realização desse trabalho, toda sua dedicação, amizade e compartilhamento de conhecimentos.

Aos servidores técnico-administrativos da UFLA, em especial à Raisa (CTM), Claret (CTM), Carlos (serraria), Heber (usinagem), Lorrán (anatomia), Aline (microscopia eletrônica), que me auxiliaram com muito profissionalismo ao longo desses anos.

Aos representantes da banca pela disponibilidade de seu tempo e conhecimento científico crítico para melhoria do presente trabalho.

À equipe da DPGA e aos amigos do SindUFLA por compreenderem e me apoiarem nessa dupla jornada de estudos e trabalho na UFLA.

Aos amigos que de alguma forma me ajudaram durante o doutorado, em especial, Renata, Thaty, Maria Fernanda, Bruno, Thaís, Ana Clara, Claudinéia, Yoni. Muita gratidão pela amizade e apoio de vocês.

RESUMO

O lenho de reação possui propriedades diferenciadas quando comparado ao lenho normal. Porém, estudos em relação à sua formação e distribuição ao longo do tronco ainda são escassos, especialmente para espécies florestais propensas à formação de lenho de tração. Pesquisas sobre biomecânica e caracterização de árvores inclinadas podem contribuir para a compreensão das estratégias utilizadas pelas árvores durante seu desenvolvimento para reorientar seus troncos para a posição vertical. Esse estudo teve como objetivo investigar a dinâmica do desenvolvimento dos elementos estruturais em troncos propensos à formação de lenho de tração. Foram coletados seis troncos de *Corymbia citriodora* aos 60 anos de idade, sendo três eretos e três inclinados e foram definidas duas escalas, uma macro: em que a deformação residual longitudinal (DRL) foi medida em quatro posições em torno do tronco a 1,30 m de altura, enquanto o índice de não circularidade (INC) e a excentricidade da medula dos discos foram calculados para diferentes alturas dos troncos: base, e a 3 e 6 m a partir da base. A orientação do desvio de medula ao longo dos troncos também foi investigada, bem como a análise da densidade básica. Para a escala micro: foi utilizada a microscopia eletrônica de varredura (MEV) para verificar a presença de camada gelatinosa e conformação das fibras nos diferentes lenhos; foram medidos também o ângulo de microfibrilas (AMF) pela técnica da microscopia de luz polarizada e, para as medidas de frequência, área e arquitetura dos elementos de vasos foi usada a microtomografia computadorizada de raios-X. Foi encontrada distribuição heterogênea de DRLs em torno dos troncos, mesmo nos troncos eretos, porém com menor magnitude. Foram observados INCs mais altos para todas as árvores amostradas na base devido ao espessamento basal. Houve diferença significativa da excentricidade da medula entre os dois tipos de troncos, enquanto os padrões de mudança de orientação do desvio da medula foram influenciados pela forma e tipo de tronco. Em relação à densidade básica, houve diferença significativa entre as regiões radiais analisadas, sendo em geral mais densas próximas ao alburno e menos densas, no lenho juvenil, próximas à medula, independentemente de serem classificadas como troncos eretos ou inclinados. Com o MEV constatou-se a presença de fibras com camada gelatinosa em algumas regiões do lenho de tração, e formatos similares das fibras nos lenhos normal e oposto. O AMF apresentou o menor valor de 8,5° e valor máximo de 16,5° entre as regiões analisadas, sendo o menor AMF encontrado no lenho de tração. A frequência dos elementos de vasos aumentou no lenho de tração, porém sua área total foi menor comparada ao lenho oposto. A arquitetura dos elementos de vasos foi variável para cada tipo de tronco nas direções radial e longitudinal, apresentando geralmente estrutura sinuosa, típico de grã intercruzada, ou espiralada em troncos inclinados, e levemente inclinada em troncos eretos. Considerando os resultados obtidos, a espécie *Corymbia citriodora* apresentou características relevantes para se compreender as estratégias e tendências utilizadas no desenvolvimento do lenho de tração em árvores adultas.

Palavras-chave: biomecânica de árvores; microtomografia computadorizada; angiospermas; deformação residual longitudinal; excentricidade da medula.

ABSTRACT

Reaction wood has different properties when compared to normal wood. However, studies regarding its formation and distribution along the trunk are still scarce, especially for forest species prone to the formation of tension wood. Studies on biomechanics and characterization of leaned trees can contribute to the understanding of the strategies used by trees during their development to reorient their trunks to the vertical position. This study aimed to investigate the dynamics of the development of structural elements in trunks prone to the formation of tension wood. It was collected six *Corymbia citriodora* trunks at 60-years-old, being three straight and three leaned trees, two scales were defined, one macro: in which the longitudinal residual strain (LRS) was measured in four positions around the trunk at 1.30 m height, while the out-of-roundness index (OOR) and pith eccentricity of the disc were calculated for different heights of the trunks: stump, three and six meters. The orientation of the pith deviation along the trunks was also investigated, as well as the analysis of the basic density. For the microscale: scanning electron microscopy (SEM) was used to check the presence of a gelatinous layer and conformation of the fibers in the different wood; the microfibril angles (MFA) was also measured using the polarized light microscopy technique, and X-ray micro-computed tomography was used to measure the frequency, area, and architecture of vessel elements. Heterogeneous distribution of LRSs was found around the trunks, even in the straight trunks, but with a lower magnitude. Higher OORs were observed for all trees sampled at the stump due to basal thickening. There was a significant difference in the pith eccentricity between the two types of trunks, while the patterns of change in the orientation of the pith deviation were influenced by the shape and type of trunk. Regarding the basic density, there was a significant difference between the radial regions analyzed, being in general denser near sapwood and less dense, in the juvenile wood, close to pith, regardless of being classified as straight or leaned trunks. SEM showed the presence of fibers with a gelatinous layer that was found for some regions of the tension wood, and similar shapes of the fibers in the normal and opposite wood. The MFA presented the lowest value of 8.5° and the highest value of 16,5° between the analyzed regions, being the lowest one in the tension wood. The frequency of the vessel elements increased in the tension wood but its total area was smaller compared to the opposite wood. The architecture of the vessel elements was variable for each type of trunk in the radial and longitudinal directions, generally presenting a sinuous structure, typical of intercrossed grain, or spiraled in leaned trunks, and slightly inclined vessels in straight trunks. Considering the results obtained, the species *Corymbia citriodora* had relevant features that enable to understand the strategies and trends used in the development of tension wood at mature trees.

Keywords: tree biomechanics; X-ray micro-computed tomography; angiosperms; longitudinal residual strain; pith eccentricity.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 <i>Corymbia citriodora</i>	13
2.2 Formação da madeira	14
2.3 Lenho de reação	16
2.3.1 Caracterização do lenho de reação	17
2.4 Tensões de crescimento	21
2.4.1 Caracterização das tensões de crescimento	23
2.5 Caracterização da forma do tronco	25
2.6 Caracterização anatômica microscópica	26
2.7 Densidade da madeira	26
2.8 Ângulo de microfibrilas	27
3. MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1 Local de coleta e material biológico	29
3.2 Diâmetro à altura do peito (DAP), orientação do tronco e inclinação	29
3.3 Deformação residual longitudinal (DRL)	30
3.4 Corte das árvores, retirada e preparação dos discos e amostras	31
3.5 Índice de não circularidade (INC)	32
3.6 Excentricidade da medula (EM)	33
3.7 Orientação do desvio da medula ao longo do tronco	34
3.8 Preparo das amostras	34
3.9 Caracterização da parede celular no microscópio eletrônico de varredura (MEV)	35
3.10 Microtomografia computadorizada de raios-X (micro-CT)	36
3.11 Medição do ângulo das microfibrilas (AMF) e densidade básica	37
3.12 Desenho experimental e análise estatística	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1 Deformação residual longitudinal (DRL)	40
4.2 Índice de não circularidade (INC)	45
4.3 Excentricidade da medula (EM)	47
4.4 Orientação do desvio de medula ao longo do tronco	50
4.5 Densidade básica	53
4.6 Ângulo das microfibrilas (AMF)	57
4.7 Correlação entre densidade básica e AMF	61
4.8 Caracterização da parede celular no microscópio eletrônico de varredura (MEV)	63
4.9 Micro-CT - Análise de imagens bidimensionais	64
4.10 Micro-CT - Análise de imagens tridimensionais	66
5. CONCLUSÕES	76
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1. INTRODUÇÃO

A compreensão da dinâmica de desenvolvimento e formação do lenho das árvores é importante no estudo da estabilidade das árvores. A flexibilidade que as árvores possuem para se manterem em pé por longos períodos, influenciada por fatores externos, é uma característica intrínseca na sua estabilidade dinâmica. Essa habilidade só é possível pela capacidade do indivíduo arbóreo desenvolver tensões de crescimento ao longo do tronco (KUBLER, 1987). Muitas vezes, dependendo da intensidade dessas tensões, o desenvolvimento das árvores é alterado, formando troncos com formatos mais irregulares e/ou inclinados, podendo desenvolver lenho de reação.

Quando a árvore cresce com determinada inclinação em relação ao solo, esforços internos são desenvolvidos para reorientá-la à posição mais estável, geralmente, a vertical (TIMELL, 1986; DIGBY, FIRN, 1995; FOURNIER et al., 2014). Em complementação, alguns pesquisadores afirmam que a gravidade exerce papel fundamental na resposta da árvore à formação do lenho de reação (WARDROP, 1964; WESTING, 1965), seguido por outras variáveis ambientais e mecanismos fisiológicos, os quais diferem de uma espécie para outra (GARDINER et al., 2014). No desenvolvimento do caule principal, a maioria dos estímulos recebidos são abióticos, os quais direcionam e moldam a formação do lenho, influenciando a atuação de seus mecanismos endógenos, como os fatores genéticos e controles hormonais (NUGROHO et al., 2012; GARDINER et al., 2014). Dessa forma, o caule pode desenvolver como lenho normal ou como lenho de reação dependendo da intensidade dos fatores externos.

Considerando a diversidade e maior magnitude desses fatores agindo na formação do lenho de reação, este tende a desenvolver-se em lenho específico denominado lenho de compressão, quando formado no lado comprimido ou inferior do tronco inclinado em gimnospermas, e lenho de tração, no lado tracionado ou superior de troncos inclinados, em angiospermas; sua função é garantir as tensões necessárias para reorientação do tronco verticalmente, sendo as regiões contrárias aos lenhos de reação denominadas de lenho oposto (WILSON; ARCHER, 1977; GARDINER et al., 2014).

As diferenças na formação do lenho de reação entre espécies angiospermas e gimnospermas ainda não são totalmente compreendidas, levantando questionamentos à respeito da evolução de elementos de vasos e fibras em espécies angiospermas na formação do lenho de

tração, por exemplo. Estudos comparativos de fósseis de espécies angiospermas ancestrais, sugerem que mudanças na quantidade de lignina, ângulo de microfibrilas e bioquímica das paredes celulares em fibras, representaram fatores significativos na evolução do lenho de tração, e não apenas a evolução dos elementos de vasos, isoladamente (GROOVER, 2016), por isso a importância de se estudar a caracterização do lenho sob diferentes aspectos.

Na busca pelo equilíbrio dinâmico para manterem-se na posição vertical, as células do lenho vão sofrendo maturações na parede celular as quais criam pequenas tensões ao longo de toda extensão do tronco (KUBLER, 1987). O acúmulo dessas tensões na direção longitudinal é denominado de tensões de crescimento as quais contribuem para a melhor distribuição do acúmulo de massa no crescimento da árvore e na percepção dos fatores abióticos (KUBLER, 1987). Geralmente, considerando o tronco ereto, forças de tração atuam nas camadas mais externas do tronco e, conseqüentemente, comprimem a parte central do lenho (ARCHER, 1986). Todas as árvores possuem essa característica intrínseca, justamente para manterem-se na posição vertical ou próximo a ela. Entretanto, é na formação do lenho de reação que a magnitude dessas tensões é acentuada, provocando o desenvolvimento de um lenho com propriedades físicas, químicas, anatômicas e mecânicas diferenciadas quando comparado ao lenho normal. Apesar das diferenças entre si, os lenhos de tração e compressão tendem a apresentar seção transversal elíptica ou irregular para manter as tensões de crescimento balanceadas considerando o peso total da árvore (WESTING, 1965; GARDINER et al., 2014).

Em algumas espécies que apresentam crescimento excêntrico do tronco é possível notar a presença de espessamento basal. Esse espessamento causa irregularidades na superfície do caule – não circularidade – mas, são responsáveis por fornecer resistência necessária ao equilíbrio dinâmico para se manter uma árvore em pé. O espessamento basal muda a forma do tronco e, considerando sua seção transversal, geralmente indica a ocorrência de desvio da medula. Estudos que calculam o índice de não circularidade dos troncos (SINGLETON et al., 2003; FALLAH et al., 2012), bem como a medida das tensões de crescimento das árvores em campo, como pela deformação residual longitudinal (LIMA et al., 2015), são ferramentas importantes para determinar o rendimento da madeira serrada e ainda possíveis comportamentos durante o desdobro das toras. Dessa forma, o estudo da forma do tronco deve ser levado em consideração pois além do aspecto relacionado com a estabilidade das árvores, fornece indícios da qualidade tecnológica da madeira, de grande relevância econômica para o setor madeireiro.

Há consenso de que o lenho de tração é um material que sofre maiores instabilidades dimensionais quando comparado ao lenho normal (WIMMER; JOHANSSON, 2014; CLAIR THIBAUT; SUGIYAMA, 2005), preterindo sua utilização. Apesar disso, a compreensão da biomecânica e estrutura do tronco é assunto de grande interesse no processo evolucionário das espécies arbóreas como indivíduos sésseis. Uma vez que, essa habilidade em desenvolver lenho de reação é essencial para manter as árvores em pé apesar de receberem diversos fatores adversos à sua manutenção na posição vertical (GROOVER, 2016).

Geralmente, o lenho de tração é caracterizado pela presença de fibras com camada gelatinosa, uma camada espessa rica em celulose (GIERLINGER; SCHWANNINGER, 2006). Entretanto, um dos problemas em relação à identificação do lenho de tração é que algumas espécies não formam camada gelatinosa (WILSON; ARCHER, 1977), ou apresentam poucas fibras com presença dessa camada, como algumas espécies do gênero *Eucalyptus* (QIU et al., 2008), mesmo estando sob condições ideais para sua formação. Além disso, algumas espécies dicotiledôneas apresentam leve estresse de compressão no lenho oposto como aperfeiçoamento da eficiência biomecânica das árvores no mecanismo de reorientação dos fustes/galhos (CLAIR; ALMÉRAS; SUGIYAMA, 2006).

As análises macroscópicas e microscópicas da madeira são ferramentas eficazes na caracterização anatômica do lenho, sendo muito empregada para identificação e para subsidiar sua utilização. A microscopia de luz polarizada é uma das metodologias empregadas na medida do ângulo das microfibrilas das fibras (LENEY, 1981), auxiliando também na caracterização do lenho de reação. Geralmente, o ângulo menor, quase paralelo ao eixo longitudinal das fibras, caracteriza o lenho de tração em angiospermas (DONALDSON, 2008). Outras técnicas avançadas, como a microscopia eletrônica de varredura, permitem, por exemplo, visualizar com alta resolução a morfologia da parede celular de fibras, inclusive a presença da camada gelatinosa (CLAIR; THIBAUT, 2001). Além disso, estudos que utilizam microtomografia computadorizada de raios-X, permitem visão tridimensional do comportamento dos elementos celulares constituintes do lenho (BRERETON et al., 2015), contribuindo na compreensão da formação dos lenhos.

Considerando os escassos relatos científicos em relação à caracterização e formação do lenho de tração e sua importância econômica, a seleção de uma espécie arbórea angiosperma com grande destaque produtivo por seus usos múltiplos, que esteja em idade mais avançada, ou seja,

com própria formação de lenho adulto e, ainda, propensa à formação de lenho de tração se faz necessária. Portanto, visando compreender a dinâmica da estabilidade das árvores em troncos propensos à formação de lenho de tração, foi escolhida a espécie *Corymbia citriodora* que ajustou-se às premissas de interesse para esta pesquisa, além de possuir alta densidade básica quando comparada às demais espécies do gênero e da família Myrtaceae.

É conhecido que troncos inclinados podem não indicar necessariamente a presença de lenhos de reação, bem como troncos eretos podem apresentar regiões com sua formação. Adiciona-se a isso a noção da complexidade da formação do lenho, o que permite supor que a análise da caracterização de troncos inclinados de *C. citriodora* com propensão à formação de lenho de tração poderá contribuir para a compreensão da estabilidade dinâmica de manutenção das árvores em pé.

OBJETIVO

Este estudo teve como objetivo caracterizar a macro e microestrutura de troncos de *Corymbia citriodora* propensos à formação de lenho de tração no sentido medula-casca e longitudinal, de forma a contribuir para o entendimento da estabilidade das árvores, além de permitir a comparação das estratégias utilizadas na diferenciação da madeira formada.

Para alcançar esse objetivo, foram estabelecidas as seguintes metas para caracterização dos troncos eretos e inclinados:

- i. medição da deformação residual longitudinal;
- ii. cálculo do índice de não circularidade;
- iii. medição da excentricidade da medula;
- iv. análise da orientação do desvio de medula ao longo do tronco;
- v. determinação da densidade básica;
- vi. visualização da parede celular no microscópio eletrônico de varredura;
- vii. medição do ângulo das microfibrilas;
- viii. análise da microtomografia computadorizada de raios-X

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 *Corymbia citriodora*

Corymbia citriodora pertence à família Myrtaceae e a tribo Eucalypteae, e já foi taxonomicamente classificada como pertencente ao gênero *Eucalyptus* (HILL; JOHNSON, 1995). Dessa forma, é comum encontrar a denominação *E. citriodora* para essa espécie em pesquisas anteriores. Há ainda outra classificação, dividindo-a em outras duas subespécies: *C. citriodora* subsp. *citriodora* e *C. citriodora* subsp. *variegata*, de acordo com a composição química dos óleos essenciais (MCDONALD; BEAN, 2000).

Considerando sua estrutura física, geralmente, o tronco de *C. citriodora* é retilíneo, composto por casca lisa e volumosa, em torno de 30% do volume total (REIS et al., 2013), de coloração manchada devido aos diferentes estágios de intemperismo. O lenho é caracterizado por alborno de cor branca e cerne escurecido devido à grande presença de extrativos (LORENZI et al., 2003), sendo comum apresentar algumas bolsas de resina ou kinos. Os kinos servem como forma de proteção do lenho a agentes bióticos ou se formam devido a estresse mecânico ou fisiológico, mas diminuem sua resistência e, conseqüentemente, depreciam seu uso nas serrarias (CUNHA; GURGEL; PISANI, 1979). Sua grã pode ser classificada como direita ou intercruzada, sendo ocasionalmente observada como ondulada.

Estima-se que a densidade básica de *C. citriodora* varia de 0,95 a 1,01 g.cm⁻³ (REIS et al., 2013), porém já foram observados valores menores próximos de 0,520 g.cm⁻³ (MELO et al., 2016), para árvores mais jovens, em torno de sete anos de idade.

Anatomicamente, Angyalossy-Alfonso (1987) descreveu que a espécie é composta por parênquima axial paratraqueal vasicêntrico e aliforme de aletas curtas; raios finos, de poucos a numerosos; e vasos de porosidade difusa, com arranjo radial e diagonal, solitários e múltiplos, obstruídos por tilos.

No Brasil, a espécie *C. citriodora* era geralmente cultivada para se obter óleo essencial de suas folhas (VITTI; BRITO, 1999), mas devido aos incentivos de usos múltiplos da madeira, sua alta densidade básica e o desenvolvimento de híbridos interespecíficos em programas de melhoramento florestal, também é destinada a fornecer madeira de qualidade para a indústria de serrados, sendo também cultivada em sistemas agroflorestais (RADOMSKI; RIBASKI, 2010). Nos últimos anos, também tem havido incentivos ao cultivo de clones de *C. citriodora* para

produção carvão vegetal (LOUREIRO et al., 2019; MARQUESAN, et al. 2020) ou para produção de polpa celulósica (SEGURA, 2015).

2.2 Formação da madeira

O lenho ou madeira é um material biológico que possui biossíntese peculiar que se desenvolve em plantas com meristema cambial que se dividem continuamente e dão origem ao xilema e floema secundários (IAWA, 1964). Essa biossíntese, também conhecida como xilogênese, é influenciada por fatores ambientais, como o fotoperíodo e a temperatura, os quais influenciam diretamente na atuação de reguladores de crescimento vegetal (PLOMION; LEPROVOST; STOKES, 2001; MÉLANIE et al., 2014).

O processo de formação da madeira envolve basicamente cinco etapas: (i) divisão celular das células vasculares cambiais; (ii) expansão celular; (iii) deposição da parede celular secundária; (iv) programação da morte celular e (v) formação do cerne (PLOMION; LEPROVOST; STOKES, 2001; DÉJARDIN et al., 2010).

Na divisão celular (i), o sistema vascular secundário é responsável por orientar a divisão contínua das células no sentido radial, visando a manutenção de suas células meristemáticas (divisões periclinais e anticlinais) e também por iniciar a diferenciação das células novas, entre floema e xilema secundário, relacionado respectivamente ao direcionamento, externo ou interno, e distanciamento do câmbio vascular (CHAFFEY, 1999).

No início da expansão celular (ii), as células se alongam axialmente, constituindo-se estruturalmente apenas por uma fina camada de parede celular primária; sucessivamente, elas começam a se espessar, aumentando em diâmetro, com a deposição de camadas de microfibrilas celulósicas (iii), formando as camadas da parede secundária (S1, S2 e S3) até atingirem sua completa diferenciação com a deposição de lignina e outros componentes químicos (DÉJARDIN et al., 2010). Esse processo apresenta algumas singularidades, conforme a função do componente celular em formação, tendendo a ser mais expressivo no sentido axial para as fibras. Inversamente, nos vasos, a tendência é apresentar um maior desenvolvimento radial quando comparado ao longitudinal (DÉJARDIN et al., 2010).

Concomitante ao início da deposição da parede celular secundária (iii), ocorre o processo de lignificação celular (DONALDSON, 2001). A deposição de lignina se inicia a partir dos cantos celulares, se estende para a lamela média e para a parede primária e, finalmente, se

direciona para a parede secundária. DÉJARDIN et al. (2010) afirmaram que a lignina em associação às hemiceluloses disponíveis na parede celular torna aquele microambiente hidrofóbico e rígido, inviabilizando a vitalidade da célula e iniciando a programação da morte celular (*iv*), que consiste na dissociação das membranas dos vacúolos liberando enzimas hidrolases que catabolizam o conteúdo citoplasmático. Os autores destacam que apesar da lignificação apresentar ligação direta com a programação da morte celular (*iv*) para a maioria dos componentes celulares, as células parenquimáticas radiais, excepcionalmente, conseguem manterem-se funcionais por diversos anos, fazendo a inter-conexão entre os tecidos do xilema e floema secundários, além do armazenamento de substâncias.

No decorrer do tempo, com a disfuncionalidade dos parênquimas radiais, ocorre a liberação das substâncias armazenadas (SHAIN, 1995), geralmente formadas por compostos fenólicos (extrativos), que contribuem na formação do cerne (*v*). Alguns autores sugerem que o início do processo de cernificação pode estar relacionado com o acúmulo de dióxido de carbono (CARRODUS, 1971), e outros pela produção do gás etileno (HILLIS, 1987). Entretanto, nenhuma dessas hipóteses explica completamente a variação na distribuição do cerne em diferentes espécies e idades. Apesar disso, quando comparado ao alburno, o cerne apresenta coloração escurecida, e menor permeabilidade e umidade (TAYLOR; GARTNER; MORRELL, 2002), que indiretamente, junto aos extrativos químicos, garantem maior prevenção aos agentes degradadores da madeira.

Ainda em relação à xilogênese, é importante destacar a disposição do conjunto das células do lenho em relação ao eixo longitudinal do tronco, denominada grã, que pode se apresentar alinhada ou inclinada. Considerando a grã inclinada, sua inclinação pode se apresentar como pequenas variações no seu ângulo no plano radial (grã ondulada), ou pode aumentar sua angulação no plano tangencial no sentido medula-casca (grã espiralada), ou ainda apresentar mudanças repentinas na orientação das fibras do sentido horário para o anti-horário (grã intercruzada) (HEJNOWICZ, ROMBERGER, 1979).

O mecanismo mais aceito em relação à formação das grãs inclinadas ocorre durante o processo de divisão anticlinal das células do lenho e subsequente crescimento intrusivo das células filhas que se direcionarão para esquerda ou direita (LARSON, 1994). A tendência de direcionamento das células é influenciada pela magnitude e direção de alguns parâmetros físicos predominantes durante a maturação celular, como por exemplo, pela intensidade das tensões de

crescimento (SCHULGASSER, WITZTUM, 2007).

A grã intercruzada é mais frequente em angiospermas do que em gimnospermas (NORTHCOTT, 1967), podendo ser considerada uma alternativa de otimizar o controle mecânico da árvore (BOSSU et al. 2018). Além disso, Webb (1969) propôs que a grã intercruzada pode melhorar o fluxo de água das raízes até a copa. Apesar dos supostos benefícios biomecânico para as árvores, esse tipo de grã é geralmente associado à empenamentos e rachaduras durante o processamento da madeira (WEBB, 1969).

2.3 Lenho de reação

Ao receber esforços mecânicos externos, como a incidência de ventos e a própria ação da gravidade sobre sua massa total, as árvores conseguem flexionar seus troncos e galhos sem romperem sua estrutura até determinado limite (WILSON, ARCHER, 1977). Como resultado desse comportamento dinâmico é formada uma madeira particular denominada de lenho de reação. Fisher e Stevenson (1981) acrescentam que a formação do lenho de reação é um mecanismo ativo e endógeno das plantas, geneticamente programado para reorientação de seus eixos, o qual causa mudanças anatômicas estruturais.

Os reguladores de crescimento envolvidos na formação do lenho de reação tem sido estudados, geralmente, por meio de sua aplicação exógena ou de seus inibidores nas plantas para verificação dos efeitos (FAGERSTEDT et al., 2014). O aumento na quantidade de auxina pode induzir a formação do lenho de compressão, enquanto, seu déficit pode induzir a formação de lenho de tração (FELTEN, SUNDBERG, 2013). O gás etileno é conhecido por ser produzido em resposta à estresses mecânicos, como por exemplo, na inclinação de caules, aumentando a atividade cambial e formação de lenho de reação, observado pelo crescimento radial assimétrico (DU, YAMAMOTO, 2007). As giberelinas são outro grupo de reguladores de crescimento de plantas que promovem crescimento secundário e expansão longitudinal das fibras (ERIKSSON et al., 2000). Em um estudo realizado por Funada et al. (2008) em caules eretos de espécies angiospermas com aplicação exógena de giberelinas mostrou o desenvolvimento de lenho de reação com presença de fibras com camada gelatinosa mesmo com ausência de estímulo gravitacional. Entretanto, estudos moleculares e genômicos são necessários para se confirmar tais observações (FAGERSTEDT et al., 2014).

O desenvolvimento do lenho de reação é induzido basicamente pelo estado de tensão que é gerado nas novas camadas de crescimento localizados próximos ao câmbio quando recebem forte estímulo ambiental (BARNETT; JERONIMIDIS, 2003), como a ação gravitacional, incidência de ventos constantes ou fototropismo.

Quando as tensões são persistentes e possuem maior magnitude, elas se acumulam no lenho e a árvore desenvolve certo tipo de lenho denominado “lenho de tração” quando ocorre em angiospermas – devido a sua particularidade em formar-se no lado tracionado da estrutura lenhosa, e “lenho de compressão” em gimnospermas – na porção do lenho que está sob compressão. Porém, é necessário destacar que é justamente devido a essa característica que a árvore é capaz de manter-se em pé, apesar das adversidades incidentes dos fatores externos.

Essa característica é percebida principalmente em galhos e troncos de árvores inclinadas, os quais tendem a desenvolver certa excentricidade da medula, modificando a qualidade da madeira nessas regiões. Geralmente, para fins de processamento, essa madeira não apresenta boas características, pois as toras geralmente apresentam rachaduras de topo e distorções nas tábuas quando serradas (KUBLER, 1987; BAILLÈRES et al., 1996), diminuindo consideravelmente o rendimento no desdobro.

Outro exemplo da qualidade do lenho de reação seria no processo de polpação da celulose. Aguayo et al. (2012) afirmaram que no processo de polpação do lenho de tração de *Eucalyptus globulus*, a maior quantidade de xilanas e menor conteúdo de lignina causaram uma diminuição no consumo do álcali ativo, melhoria das propriedades mecânicas da polpa e branqueamento similar à polpa produzida do lenho oposto. Entretanto, os autores ressaltam que apesar dessas melhorias, caso a proporção de lenho de tração disponível não seja abundante, os benefícios observados pode não ser suficientes quando se processa grande volume de madeira. Essa maior heterogeneidade da distribuição do lenho de tração também foi relatada como precaução para híbridos de *Eucalyptus spp.*, na qual seu rendimento da polpação pode ser menor quando comparado ao lenho normal (BOSCHETTI et al., 2017).

2.3.1 Caracterização do lenho de reação

Sob a visão macroscópica, ambos os tipos dos lenhos de reação tendem à impressão de formação de medula excêntrica (PAWSEY, 1966; JOUREZ, 1997; TIMMEL, 1986), causada pelo estímulo de maior divisão celular na porção comprimida ou tracionada do lenho com a

finalidade de manter a sustentação biomecânica da árvore. Geralmente, na seção transversal deste tipo de árvore, é visualmente notável a medula descentralizada do seu posicionamento geométrico. Em resposta ao conjunto de tensões adversas durante a maturação das células no lenho, um lado do tronco se desenvolve mais do que o oposto, gerando crescimento assimétrico.

A excentricidade da medula é uma característica típica do lenho de reação (KOLLMANN, CÔTÉ Jr, 1968; TIMMEL, 1986; GARDINER et al., 2014), e influencia na distribuição do lenho juvenil e adulto, diminuindo o valor agregado do produto final (SINGLETON et al., 2003). Porém, troncos eretos também estão sujeitos à ocorrência da medula excêntrica em menor proporção. Ferreira et al. (2008), encontraram excentricidade da medula média de 4,5% para clones de *Eucalyptus sp.* plantados em local plano devido à incidência de ventos no local de plantio. Washusen, Ades e Vinden (2002) também notaram a ocorrência de medula excêntrica em árvores de tronco ereto de *E. globulus*.

Radomski e Ribaski (2010) realizaram um estudo da excentricidade da medula em *C. citriodora* (19 anos de idade) em sistemas agrosilvopastoris com espaçamento médio 30 x 1,5 m, e classificaram os fustes das árvores de acordo com a tortuosidade e observaram excentricidade da medula variando entre 4,2 a 10,9% para fustes eretos, e entre 5,6 e 31,4 % para os fustes tortuosos com ramificação ou bifurcação.

Considerando o aspecto anatômico, é importante destacar a variação na composição da parede celular secundária na xilogênese, particularmente, da estrutura das fibras diferenciadas em relação ao lenho normal e de reação. Segundo Mikshina et al. (2013), existem duas principais diferenças entre fibras: as do tipo “xilanas” e as do tipo “gelatinosas”. As primeiras são comumente encontradas em vários tipos de células que possuem crescimento secundário das plantas terrestres, possuindo uma parede secundária caracterizada por uma orientação helicoidal das microfibrilas celulósicas, com grande predominância de xilanas na matriz não celulósica e um alto grau de lignificação. A orientação das microfibrilas muda conforme sua deposição, formando as diferentes camadas S1, S2 e S3 da parede celular secundária, e conjuntamente representam em torno de 1 a 4 µm de espessura Mikshina et al. (2013).

As fibras do tipo “gelatinosas” estão presentes apenas em fibras do lenho de tração e a formação da camada gelatinosa se dá no interior da camada secundária da parede celular das fibras (MIKSHINA et al., 2013). Primeiramente, sua denominação decorreu após observar-se um inchaço de sua estrutura por meio do uso de certos componentes químicos no preparo para

visualização microscópica no sentido transversal, porém, com as técnicas atuais, não se observa mais tal aspecto gelatinoso; na verdade, esse termo permaneceu devido ao comportamento gelatinoso após secagem dessa camada e sua composição estrutural semelhante ao hidrogel – característica especial de mesoporosidade (CHANG et al., 2015). Portanto, as fibras que desenvolvem essa camada gelatinosa específica recebem a denominação de fibras gelatinosas, com composição química de até 90% de celulose de alta cristalinidade (NORBERG, MEIER, 1966).

Em gimnospermas, o lenho de compressão geralmente apresenta traqueídes com formato mais arredondado, espaços intercelulares e camada S2 da parede secundária mais espessa (apresentando alto ângulo de microfibrilas), maior quantidade de lignina e, inversamente, menor quantidade de celulose, quando comparado ao lenho normal ou oposto (CÔTÉ; DAY, 1965; WESTING, 1965; TIMELL, 1973; TIMELL, 1986).

As fibras do lenho de tração são mais alongadas, com paredes celulares mais espessas e, consequentemente, com menor diâmetro do lume (DÉJARDIN et al., 2010). Essas fibras geralmente apresentam camada gelatinosa, formato mais achatado ou retangular no plano transversal em relação as fibras do lenho normal (CLAIR et al. 2006), com composição química rica em celulose com alta cristalinidade e com pouca ou quase nenhuma presença de lignina (JOSELEAU et al., 2004; GIERLINGER; SCHWANNINGER, 2006). Fisicamente, a presença do baixo AMF nessa camada específica – praticamente paralelo ao eixo da fibra (FARUYA; TAKAHASHI; MIAZAKI, 1970), confere maior estabilidade mecânica – baixa contração longitudinal – principalmente nos anéis mais externos responsáveis pela manutenção do lenho inclinado (BARNETT; BONHAM, 2004).

Jourez, Riboux e Leclercq (2001a) analisando a anatomia do lenho de reação de *Populus euramericana* constaram que apesar haver aumento no comprimento dos elementos de vasos no lenho de tração, houve diminuição na sua frequência e, consequentemente, menor volume total de elementos de vaso quando comparado ao lenho oposto. Resultados similares foram observados no estudo de Ruelle et al. (2006) analisando 21 espécies tropicais com formação de lenho de tração e oposto. Entretanto, Brereton et al. (2015) analisou que para *Salix sp.* apesar de notarem uma redução da frequência dos elementos de vasos no lenho de tração, o volume total dos mesmos aumentou consideravelmente, como provável forma de compensar a manutenção da condutividade de seiva bruta.

Particularmente, o gênero *Eucalyptus* e alguns de seus híbridos já foram reportados na literatura por apresentarem lenho de tração com presença de camada gelatinosa em fibras, como em um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (BOSCHETTI, 2014) e em *E. globulus* (WASHUSEN; ADES; VINDEN, 2002). Porém, ainda não foram encontrados estudos que evidenciam a presença desta camada em *Corymbia citriodora*.

Alguns pesquisadores fazem ainda analogia da capacidade que a camada gelatinosa tem em gerar tensões, às contrações musculares da fibra animal (MELLEROWICZ; IMMERZEEL; HAYASHI, 2008; MIKSHINA et al., 2013; GORSHKOVA et al., 2018; CLAIR et al., 2018). Porém, ao invés de dependerem energeticamente de interações entre proteínas, como ocorre em células animais, nas células vegetais, as forças de tensões derivam de polissacarídeos constituintes da própria parede celular. Com o acúmulo de pequenas tensões dentro das células por período prolongado, é possível direcionar forças considerando o conjunto de células tensionadas, as quais contribuem para o reposicionamento do caule para a posição vertical (GORSHKOVA et al., 2018).

Paralelamente, há uma outra discussão relacionada à camada gelatinosa ser ou não uma camada terciária. Gorshkova et al. (2018) propuseram que a camada gelatinosa é, de fato, uma camada terciária, pois, essa camada se desenvolve depois da formação das camadas primárias e secundárias da parede celular e, ainda, por um conjunto de fatores de transcrições diferentes daqueles responsáveis pela formação dessas duas primeiras camadas. Além disso, os autores alegam que essa camada possui sua composição, arquitetura e propriedades físicas divergentes das demais.

Por outro lado, Clair et al. (2018) ratificaram que o desenvolvimento da camada gelatinosa faz parte da fase de espessamento da parede celular, e consequentemente, deveria ser considerado como uma camada da parede celular secundária e não uma camada terciária. Os pesquisadores afirmam que a diferenciação da camada gelatinosa ocorre devido à uma modificação na sequência de deposição das camadas secundárias, ao invés da adição de uma terceira fase no desenvolvimento da parede celular. Isso pode ser mais claramente compreendido quando observamos fibras que do tipo S1 + G, ou seja, aquelas que não possuem camada secundária e formam a camada gelatinosa logo após a deposição da camada primária com uma transição suave entre as camadas (HIGAKI, YOSHINAGA, TAKABE, 2017).

Outra consideração é que algumas espécies angiospermas formam multicamadas nas paredes celulares de fibras, alternando camada S3 (parede secundária) e camada gelatinosa sucessivamente (RUELLE et al., 2007), o que torna insustentável o fato da camada gelatinosa ser considerada uma camada terciária. Além disso, a camada gelatinosa pode apresentar uma transição suave do ângulo microfibrilar entre camadas (como as fibras do tipo S1 + G) ou, ocorrer de forma abrupta, entre as camadas S2 e G, o que pode acabar gerando artefatos, como a separação entre essas camadas no processo de seccionamento transversal da fibra no uso do micrótomo como processo de preparação da amostra para observação no microscópio eletrônico de varredura (CLAIR, THIBAUT, SUGIYAMA, 2005), dando a impressão de ser uma camada à parte.

Dessa forma, Clair et al. (2018) propõem que o termo “camada terciária” seja designado às camadas formadas por processos fisiológicos completamente diferentes daqueles que ocorrem na formação da camada secundária, ou seja, apenas o que é formado no processo de morte celular programada, incluindo a formação da camada verrucosa e a deposição de extrativos dentro da célula durante a formação do cerne. Por outro lado, os autores sugerem que o termo “camada gelatinosa” seja definido como parte integrante da camada secundária da parede celular, caracterizada pela orientação praticamente paralela das microfibrilas em relação ao eixo axial celular, uma matriz celulósica com alta mesoporosidade, e a habilidade de gerar alto estresse de maturação celular.

2.4 Tensões de crescimento

As tensões de crescimento são características intrínsecas das árvores, especialmente quando elas estão em pleno desenvolvimento em altura, no qual são produzidos esforços mecânicos que resultam no acúmulo de tensões no lenho geradas no processo de maturação celular (KUBLER, 1987).

Durante a maturação das fibras ou traqueídes, com o incremento de novas camadas de crescimento adjacentes, há um processo de compressão no lenho juvenil, causado pelas progressivas forças de tração atuantes nas periferias dos troncos (BOYD, 1985a). Archer (1986) afirma que as forças de tração são observadas até aproximadamente 1/3 da distância radial

partindo-se da casca em direção à medula, depois progressivamente alternam-se para forças de compressão mais ao centro do tronco.

A origem das tensões de crescimento é discutida basicamente por dois mecanismos. No primeiro deles, propõe-se que o processo de lignificação resulta em expansão transversal das fibras (BOYD, 1985a), enquanto o segundo, considera que a cristalização da celulose resulta em contração longitudinal (BAMBER, 2001).

Bamber (2001) propôs que a celulose está relacionada ao processo de geração de tensões de tração e compressão no lenho de reação. Considerando o lenho de tração, a baixa lignificação da camada gelatinosa das fibras aliada à angulação das microfibrilas celulósicas, orientadas praticamente paralelas ao eixo axial da célula, permitem maior resistência às forças de tração (BAMBER, 2001). Clair et al. (2006) conseguiram provar que o estresse de tração se desenvolve na matriz celulósica da parede celular durante a maturação celular. Os pesquisadores analisaram a estrutura das microfibrilas celulósicas *in situ* por meio da tecnologia de feixes de raios-X *synchrontron*, e constataram que os cristais de celulose estão mais espaçados sob estresse de tração comparado ao seu estado final, após liberação dessas tensões.

No lenho de compressão, Bamber (2001) acrescenta que o incremento em lignificação dos traqueídes é considerado apenas um mecanismo acessório de aumento de resistência às forças de compressão. Contradizendo Boyd (1985a), que afirma que o aumento da lignificação é o processo principal na geração de resistência de compressão neste lenho.

Outras hipóteses a respeito da geração das tensões na maturação celular divergem-se dependendo do tipo de abordagem – mecânica, química ou física – e também do tipo de lenho, normal ou de reação. Se considerarmos as fibras da madeira de tração, mais particularmente em se tratando das fibras capazes de produzir camada gelatinosa, pode-se discutir a respeito de como ocorre um dos mecanismos sob o ponto de vista bioquímico/imunocitoquímico.

Mellerowicz, Immerzeel, Hayashi (2008) estabeleceram uma hipótese em que a xiloglucana, um dos carboidratos presentes na parede celular vegetal, exerce um papel fundamental na geração do estresse de maturação e na formação de lenho de tração em troncos inclinados. Os pesquisadores sugerem que na formação de uma macrofibrila celulósica, na qual quatro microfibrilas adjacentes se cristalizam devido à baixa quantidade de hemicelulose (MÜLLER, BURGHAMMER, SUGIYAMA, 2006), as xiloglucanas ficam aprisionadas dentro dessa estrutura. Essa ação gera um estresse de tração longitudinal que leva ao encurtamento da

macrofibrila pelo rearranjo dos componentes, a qual muda o espaçamento dos cristais de celulose, como já discutidos anteriormente (CLAIR et al., 2006).

O desenvolvimento do estresse de tração na camada gelatinosa é, portanto, transferido à fibra inteira devido às paredes celulares, provavelmente, serem conectadas umas às outras por ligações entre hemiceluloses, e conseqüentemente, ao tecido lenhoso que está interconectado por meio de pectinas e ligninas (CLAIR et al., 2006); uma vez que as microfibrilas celulósicas são orientadas axialmente, toda a fibra estará, portanto, também orientada axialmente, e o mesmo grau de contração será observado na superfície do fuste do lenho de reação, assim como nas fibras com presença de camada gelatinosa. Dessa forma, os autores propõem que a xiloglucana tende a formar o elo entre o estresse de tração das camadas gelatinosas e as camadas internas adjacentes da parede celular, apesar de ainda precisar se comprovar tal hipótese experimentalmente.

Posteriormente, Gorshkova et al. (2015) destacaram que essa hipótese pode ser rejeitada uma vez que comprovaram que as xiloglucanas não estão localizadas dentro da camada gelatinosa, mas sim as ramanas-galacturanonas-1 que são, de fato, os componentes aprisionados. Segundo Alméras e Clair (2016), tal constatação é mais consistente com as representações da rede de microfibrilas e o processo de agregação da matriz celulósica, embora, esse modelo deva gerar tração lateral. Apesar das diferenças entre as hipóteses, considerando um sentido amplo, as fibras ou traqueídes passam da funcionalidade motora, durante a maturação da parede celular, para a função estrutural, após a morte da célula e aquisição de máxima rigidez (ALMÉRAS; CLAIR, 2016).

2.4.1 Caracterização das tensões de crescimento

Devido às particularidades de cada árvore e sua estabilidade dinâmica para se manterem em pé, as tensões de crescimento podem apresentar diferentes padrões e magnitudes, como ocorre em árvores de troncos inclinados, com formação de lenho de reação. Dessa forma, uma maneira de se verificar essa intensidade é por meio da medição indireta das tensões de crescimento em árvores vivas, tais como utilizando o extensômetro (BAILLÈRES et al., 1995), geralmente medido em posições periféricas equidistantes do tronco à altura do peito (DAP). Essa metodologia fornece indicação das tensões liberadas – em termos de deformação residual

longitudinal (DRL) – entre dois pontos da superfície do tronco após perfurar-se um orifício (25 mm de diâmetro) entre os mesmos e haver o deslocamento do material lenhoso.

Os valores de DRL medidos na periferia dos troncos representa um conjunto de tensões acumuladas desde o início do desenvolvimento da árvore, registradas nos consecutivos incrementos das camadas de crescimento (Carvalho et al., 2010). A relação equilibrada entre valores positivos de DRL ao redor do tronco nos indica a formação de lenho normal; valores negativos de DRL, ou ainda a grande amplitude entre os valores indicam para alta probabilidade de ocorrência de lenho de reação (LIMA et al., 2004).

Carvalho et al. (2010) estudaram DRLs e as compararam com classes diamétricas distintas de *C. citriodora* e *E. urophylla* aos 15 anos de idade com espaçamento de 36 x 2 m. Os autores encontraram uma correlação negativa entre a DRL média e o diâmetro médio considerando todas as classes diamétricas amostradas de *C. citriodora*, indicando que um incremento no diâmetro das árvores resulta em uma diminuição dos valores médios de DRL. Os autores ainda afirmam que as limitações de uso da madeira de eucalipto são maiores em indivíduos arbóreos jovens, devido a presença de altas tensões de crescimento causadas, principalmente, pela maior proporção de lenho juvenil no tronco, quando comparado à árvores adultas. Além disso, eles supõe que outros fatores, como genéticos, incremento em diâmetro, tamanho e inclinação do tronco, estejam relacionados no desenvolvimento dessas altas tensões.

Lima et al. (2015) estudaram DRLs em troncos eretos de nove espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia spp* de 37 anos e descobriram que *C. citriodora* apresentou DRLs variando de 51 a 281 μm . Segundo os autores, essa espécie apresentou a maior DRL média (106,38 μm) entre as várias espécies amostradas.

Considerando a formação de lenho de reação, Ruelle et al. (2007) analisou a DRL em dez espécies tropicais e constatou que os valores médios de DRL do lado tracionado do lenho foram em média três vezes maiores do que as DRLs do lenho oposto.

Diversos estudos têm demonstrado que a madeira de *Eucalyptus spp.* apresenta maiores rachaduras de topo nas toras quando apresentam maiores DRLs (SOUZA et al. 2003; TRUGILHO; OLIVEIRA, 2008; BELTRAME et al., 2015). Silva et al. (2016) também encontraram relação semelhante para *Khaya ivorensis* e *K. Senegalensis*, duas angiospermas. Os efeitos indesejáveis da liberação dessas altas tensões, juntamente com o processo de secagem, podem ser observados após o corte das árvores ou depois de operações de desdobro na serraria,

como manifestações de empenamentos e rachaduras na tora e nas peças serradas (YANG, 2005).

2.5 Caracterização da forma do tronco

Além da DRL, estudos em relação à forma do tronco fornecem subsídios para investigarmos a qualidade da madeira e biomecânica das árvores, como por exemplo, o cálculo do índice de não circularidade (INC). Esse índice representa o quanto irregular é a seção transversal do tronco em determinada altura amostrada considerando o formato circular ideal. Assim, o INC próximo de zero representa a forma de tronco mais circular, enquanto INCs maiores, quando tende ao valor da unidade, estão relacionados a formatos de troncos assimétricos - elipse ou outras formas irregulares (SINGLETON et al., 2003).

Segundo a norma para medição e classificação de toras de madeiras de folhosas do IBDF (1984), o achatamento, em porcentagem, é calculado pela divisão do menor diâmetro pelo maior (considerando as duas extremidades da tora), multiplicado por 100. Porém, considerando a análise de seções transversais de troncos, é mais apropriado calcular-se o índice de não circularidade (INC).

O índice de não circularidade pode ser usado para estabelecer o rendimento da tora na serraria, sendo possível também o relacionarmos com a excentricidade da medula (SINGLETON et al., 2003; FALLAH et al., 2012). Fallah et al. (2012) analisou a excentricidade da medula e o INC de três espécies angiospermas na base e no DAP das árvores e constatou que a excentricidade da medula aumentou com o incremento em DAP, sendo que o INC nas bases das árvores foi maior quando comparado aos analisados nos DAPs. Portanto, um maior INC pode evidenciar a ocorrência de excentricidade da medula (lenho de reação), o qual deprecia tanto em qualidade quanto no rendimento em madeira serrada, mas proporciona melhor compreensão da biomecânica das árvores para se manterem na posição vertical.

Mattheck e Kubler (1997) afirmaram que árvores inclinadas, dependendo do afilamento ao longo do tronco, desenvolvem-se com maior conicidade no sentido da copa por terem a base mais larga ou crescem em forma sinuosa. Para ambos os casos, os autores afirmam que o gravitropismo negativo atua na redução das tensões, especialmente para aquelas que ocorrem próximas à base da árvore.

2.6 Caracterização anatômica microscópica

As metodologias de coloração utilizadas na microscopia de luz baseiam-se na interação química dos corantes com as estruturas presentes na parede celular do lenho, permitindo a diferenciação entre elas. Clair et al. (2006) analisaram a estrutura celular dos lenhos de tração para 21 espécies angiospermas utilizando o corante safranina, permitindo visualização das regiões com maior presença de lignina e o corante “fast-green”, que apesar de interagir com regiões de celulose e lignina, contrasta a camada gelatinosa das demais, pela maior presença de celulose, facilitando sua caracterização.

Outros exemplos de técnicas para visualização anatômica microscópica do lenho, porém com maior resolução, são a microscopia eletrônica de varredura e a microtomografia computadorizada de raios-X (micro-CT). A primeira fornece imagens bidimensionais com alta profundidade de campo para caracterização dos elementos estruturais, como exemplo, da camada gelatinosa em fibras do lenho de tração (DÉJARDIN et al., 2010). Por outro lado, a técnica de micro-CT é uma alternativa que permite o processamento de imagens tridimensionais de alta resolução, no sentido de compreender a arquitetura de alguns elementos estruturais do lenho ou possíveis mudanças estruturais (VAN DEN BULCKE et al., 2013; BRERETON et al., 2015).

Por meio de análise e tratamento das imagens obtidas na micro-CT, dependendo da resolução utilizada, é possível individualizar os elementos de vaso das fibras em suas respectivas posições, para se fazer um estudo aplicado à arquitetura dos mesmos, e ainda automatizar alguns processos, como o de contabilização de porosidade ou das áreas ocupadas pelos elementos de vasos. Em um estudo realizado por Brereton et al. (2015), foi possível visualizar o comportamento dos elementos de vasos nos três planos dos lenhos de tração, oposto e normal. Outro uso importante da aplicação da micro-CT pode ser na observação da modificação estrutural da madeira antes e depois da aplicação de tratamento térmico (VAN DEN BULCKE et al., 2013).

2.7 Densidade da madeira

A densidade da madeira é uma medida da estrutura interna do lenho, que considera as espessuras das paredes celulares das fibras, elementos de vaso ou traqueídes e das células do parênquima, desprezando os espaços vazios – lumes das células. Por ser um material higroscópico, a madeira varia sua densidade de acordo com a umidade.

A determinação da densidade é um importante atributo, pois estima possíveis comportamentos da madeira, ao ser relacionada, por exemplo, com outras propriedades, como a mecânica, comparando-a com os módulos de elasticidade e de ruptura (MACHADO et al., 2014); física, avaliando sua relação com a retratibilidade (OLIVEIRA; TOMAZELLO FILHO; FIEDLER, 2010); e anatômica, na sua relação com a vulnerabilidade de cavitação nos elementos de vasos (BARROTO et al., 2018).

A densidade é variável no sentido longitudinal e no sentido transversal da árvore (WOOD, SHEAR, 2002). Estudos envolvendo a espécie *Corymbia citriodora* já constataram densidades variando entre 0,520 a 0,721 g.cm⁻³, para árvores jovens, aos sete anos de idade (MELO et al., 2016); e também entre 0,550 a 0,900 g.cm⁻³, para árvores aos 60 anos de idade (LOURENÇON et al., 2013).

Além disso, a densidade básica também varia na formação do lenho de reação. Jourez et al. (2001b) compararam a densidade básica do lenho de tração e oposto de mudas de *Populus euramericana* e constataram uma densidade básica média apenas 5% maior no lenho de tração quando comparado ao lenho oposto a uma inclinação de 30° de seus caules.

Hein et al. (2015) analisaram o efeito da inclinação do terreno (0, 20 e 40°) para algumas propriedades mecânicas e físicas de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* e constatou-se que a densidade básica da madeira aumentou no sentido medula-casca de acordo com o aumento da inclinação do terreno, principalmente à 25% da altura total amostrada do tronco.

2.8 Ângulo de microfibrilas

As fibras ou traqueídes apresentam a parede celular composta basicamente por três camadas denominadas de parede primária (S1), secundária (S2) e terciária (S3). As microfibrilas celulósicas apresentam direcionamento específico dentro de cada uma dessas camadas, sendo a camada S2 mais representativa dentre as demais devido a sua maior espessura. A distância em graus entre o eixo axial das fibras ou traqueídes e a inclinação média das microfibrilas nessas camadas é denominada de ângulo de microfibrilas (AMF). Geralmente, o AMF é variável de 5 a 20° em angiospermas e em gimnospermas varia de 10 a 30° (BOYD, 1980).

Segundo Boyd (1985b), essa variação entre os AMFs das camadas de crescimento da árvore evidencia grande influência genética sobre o AMF. Entretanto, diversos estudos comprovam que essa variação está intimamente relacionada às tensões no processo de maturação

e diferenciação celular (CLAIR et al., 2006; ALMÉRAS; CLAIR, 2016), evidenciando que os fatores ambientais, em maiores magnitudes, estimulam o desenvolvimento de lenho de reação e, conseqüentemente, fibras com menores AMFs. Segundo os autores, essa menor angulação do AMF, praticamente paralela ao eixo das fibras, seria uma tentativa de garantir as tensões necessárias para o reposicionamento e manutenção do tronco na posição vertical.

Geralmente, em espécies do gênero *Eucalyptus*, o lenho juvenil tende a apresentar maior AMF em comparação à região próxima à casca (STUART; EVANS, 1995, LIMA; BREESE; CAHALAN, 2004; RAMOS et al., 2011; MEDHURST et al., 2012; LIMA, RIBEIRO, NARCISO, 2014). Souza et al. (2017), analisando a espécie *C. maculata* aos 37 anos de idade, observaram que o AMF diminuiu no sentido medula-casca, variando de 19,05 a 8,80°, com média de 12,11°.

As técnicas mais comuns de medição do AMF são a difração de raios-X (DRX) (CAVE, 1966; BOYD, 1977) e a microscopia de luz polarizada (MEYLAN, 1967). Há também outras menos utilizadas, como a de produção de microfissuras na parede celular seguida de coloração de contraste (BAILÉRES et al., 1995). A difração de raios-X, por exemplo, é uma das técnicas mais rápidas e automatizadas, comparada às demais, enquanto a microscopia de luz polarizada demanda maior disponibilidade e minuciosidade do operador. Além disso, a microscopia de luz polarizada é necessária por oferecer valores de referência para calibração do método indireto de DRX.

Considerando as técnicas disponíveis e os estudos sobre o gênero *Eucalyptus*, Stuart and Evans (1995) observaram variação de 10 a 20° no AMF para *E. nitens*, pela DRX; Yoshida, Okuyama e Yamamoto (1992) encontraram variação de 10 a 30° nos AMFs para *E. rubida* utilizando a mesma técnica. Baillères et al. (1995) utilizaram a técnica da produção de microfissuras seguida de coloração e observaram AMF variando entre 0 e 27° em híbridos de *Eucalyptus*. Entre os exemplos de uso da técnica de microscopia de luz polarizada temos o trabalho de Baba et al. (1996), que notaram AMFs próximos a 3,5° em lenhos de tração de *E. camaldulensis*, assim como o estudo de Lima, Breese e Cahalan (2004), que notaram o AMF variar entre 4,2 a 14,4° em clones de *Eucalyptus* em diferentes sítios.

No lenho de reação, o AMF está relacionado diretamente com as tensões de crescimento. Os traqueídes do lenho de compressão geralmente apresentam alto AMF e, conseqüentemente, podem resistir aos altos estresses de compressão. Enquanto as fibras do lenho de tração

apresentam baixo AMF e, assim, apresentam maior resistência às altas forças de tração (Boyd 1980).

Apesar das variações de AMF serem comprovadas para diferentes espécies florestais, ainda não se sabe precisamente os processos que ditam essas mudanças a nível celular. Barnett, Chaffey e Barlow (1998) argumentaram que o alinhamento dos microtúbulos, responsáveis pelo direcionamento de microfibrilas celulósicas na camada S2, podem ser influenciados por fatores ambientais. Posteriormente, alguns autores afirmaram que o movimento das rosetas – complexos de proteínas que sintetizam a celulose – orientam o desenvolvimento dos microtúbulos e microfibrilas (PARADEZ; SOMERVILLE; EHRHARDT, 2006). Estudos como esse, que rastreiam o controle da orientação das microfibrilas, são promissores para investigar propriamente quais mecanismos estão envolvidos nesta questão (DONALDSON, 2008).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local de coleta e material biológico

A área de coleta do material está situada em Lavras, Estado de Minas Gerais, Brasil (21°13'34"S; 44°58'03"W), em um pequeno plantio em declive suave (3 a 8% de inclinação do terreno). Nesse estudo, foram selecionadas, medidas e coletadas árvores seminais de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson com aproximadamente 60 anos.

Na seleção das árvores, evitou-se aquelas das bordas e as bifurcadas, para formar dois grupos de acordo com a inclinação do tronco: três árvores de tronco ereto (E) e três árvores de tronco inclinado (I). A escolha de apenas seis indivíduos arbóreos se justificou pela representatividade amostral dessa área (0,02 ha).

Apesar do espaçamento inicial ser de 3 x 2 m, não se encontrou registro detalhado dos tratamentos silviculturais aplicados ao longo dos anos de desenvolvimento do plantio. A descrição das medidas das árvores em pé encontram-se na Tabela 1.

3.2 Diâmetro à altura do peito (DAP), orientação do tronco e inclinação

A partir das árvores selecionadas no talhão, foram marcadas as orientações cardeais, considerando a orientação da bússola, para cada tronco, o que foi essencial para determinar e

compreender o desvio da medula ao longo da altura do tronco. Em seguida, foram medidos o diâmetro à altura do peito (DAP), o ângulo de inclinação do tronco da árvore com auxílio de um prumo e orientação dos troncos inclinados, conforme dados constantes na Tabela 1.

Tabela 1 - Diâmetro à altura do peito (DAP), orientação do tronco e ângulo de inclinação do tronco das árvores inclinadas de *Corymbia citriodora*.

Tipo de tronco	Identificação da árvore	DAP (cm)	Orientação da inclinação do tronco	Ângulo de inclinação do tronco (°)
Ereto	E1	45,19	---	0
	E2	35,49	---	0
	E3	60,79	---	0
Inclinado	I1	60,31	Norte (N)	8,11
	I2	42,65	Norte (N)	8,67
	I3	45,51	Noroeste (NW)	14,67

3.3 Deformação residual longitudinal (DRL)

A deformação residual longitudinal (DRL) foi medida em quatro posições na superfície dos caules no nível do DAP antes do corte das árvores, seguindo o procedimento descrito por Baillères et al. (1995), adaptado por LIMA et al. (2004), visando fornecer os padrões de distribuição de DRL para ambos os tipos de troncos.

Para a medição da DRL foram feitos quatro painéis equidistantes de formato retangular (Figura 1), retirando-se a casca. Para as árvores de fustes eretos foram utilizadas as quatro posições cardeais (norte, sul, leste e oeste) em volta do fuste. Para as árvores de fustes inclinados utilizaram-se as respectivas posições ortogonais (0°, 90°, 180°, 270°), levando em conta a orientação da inclinação de cada árvore inclinada como posição inicial.

Figura 1 – Procedimento para medição de DRL nas árvores vivas.



Fonte: Do autor (2021).

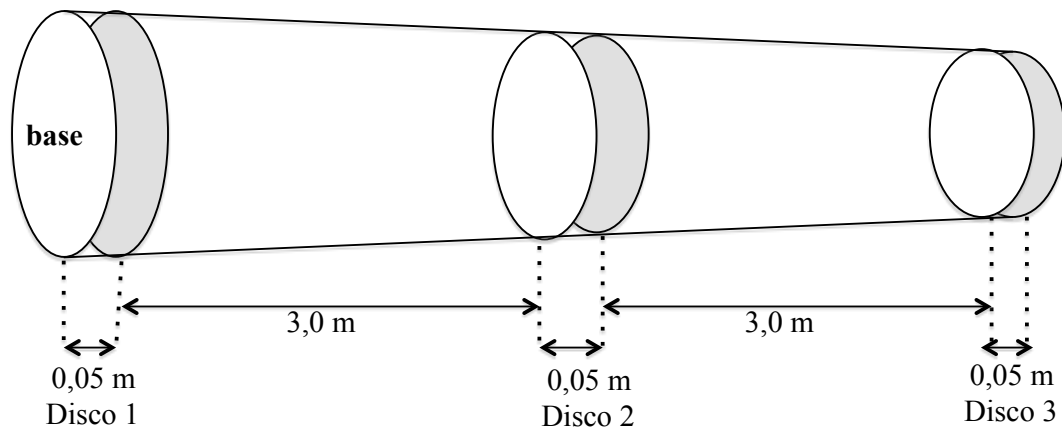
A DRL foi medida com auxílio do extensômetro, fixando dois pinos metálicos a 45 mm de distância entre si, seguindo a orientação da grã. Após apoiar o equipamento na superfície do tronco, foi feita a perfuração (com aproximadamente 25 mm de diâmetro da broca) entre os pinos metálicos usando o arco de pua. Assim, as DRLs foram registradas em um relógio comparador após a estabilização da liberação das tensões com o deslocamento do material lenhoso.

Os dados de DRL foram organizados em gráficos contendo a imagem das respectivas seções transversais da base para permitir a comparação entre indivíduos respectivos às árvores de tronco ereto e inclinado, avaliando-se o padrão de comportamento.

3.4 Corte das árvores, retirada e preparação dos discos e amostras

Após as primeiras análises em campo, as árvores foram cortadas com motosserra e transportadas para a serraria da UFLA. Considerou-se apenas os primeiros seis metros de altura de cada árvore, pois é nessa altura em que, geralmente, o lenho desenvolve os processos de reorientação dos troncos sujeitos à formação de lenho de tração. Dessa forma, foram retirados três discos de aproximadamente cinco centímetros cada, em três alturas distintas: base – 0 m (disco 1), 3 m (disco 2) e, 6 m (disco 3), conforme especificado na Figura 2.

Figura 2 – Posicionamento para retirada dos discos (base, três e seis metros) de cada tronco de *Corymbia citriodora*.



Fonte: Do autor (2021).

As seções transversais (discos) foram lixadas para evidenciar os anéis de crescimento, a medula (M) e o suposto centro geométrico do disco (G).

3.5 Índice de não circularidade (INC)

Foi usada a Equação 1 para calcular o índice de não circularidade das seções transversais em todas as alturas estudadas:

$$INC = (D_{máx} - D_{mín}) * D_{máx}^{-1} \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que:

INC – índice de não circularidade;

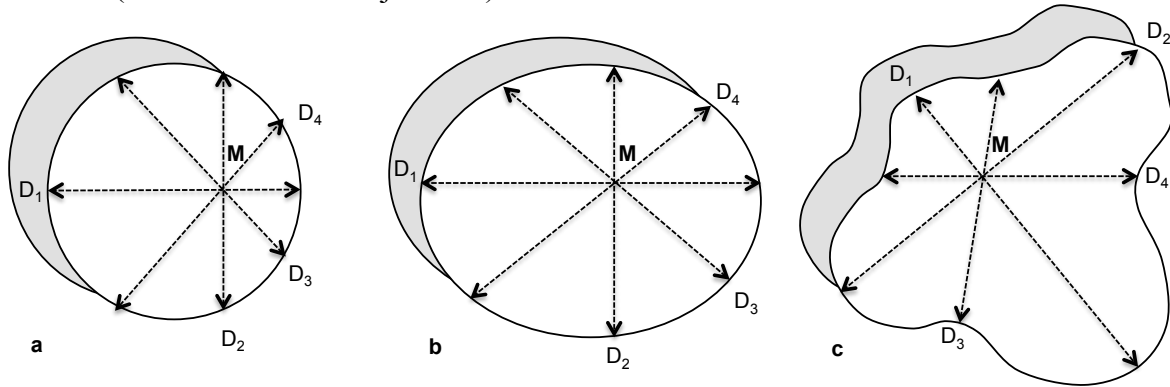
$D_{máx}$ – diâmetro máximo da seção transversal;

$D_{mín}$ – diâmetro mínimo da seção transversal.

Williamson (1975) propôs o uso da Equação 1, medindo apenas $D_{máx}$ e $D_{mín}$, considerando a medula desviada na seção transversal como o ponto de medição perpendicular, representando apenas dois valores de diâmetro medidos. No entanto, como os materiais biológicos têm suas singularidades, como troncos com espessamento basal, propõe-se a modificação na forma de coleta de dados a serem usados nessa equação para comparar formas

distintas, como circulares, elípticas e irregulares (com sulcos e cristas que formam o tronco com espessamento basal), conforme indicado na Figura 3.

Figura 3 - Representação das medidas de diâmetro para diferentes formatos do tronco - **a** circular; **b** elíptico; **c** irregular - considerando a localização da medula (M) como o ponto de intersecção entre as medidas. **D₁; D₂; D₃; D₄** representam a ordem de medição dos quatro diâmetros da seção transversal (45° entre as setas adjacentes).



Fonte: Do autor (2021).

Depois de fazer quatro medições de diâmetro, eles foram colocados em ordem crescente para determinar o maior e o menor valor a serem usados na Equação 1 como $D_{máx}$ e $D_{mín}$, respectivamente.

3.6 Excentricidade da medula (EM)

Para calcular a excentricidade da medula de cada seção transversal do tronco por altura estudada, foi usada a Equação 2:

$$EM = (DM/Dméd) * 100 \quad \text{(Equação 2)}$$

Em que:

EM – excentricidade da medula (%);

DM – desvio da medula: distância radial entre o centro geométrico (G) e a medula (M);

$Dméd$ – diâmetro médio (considerando a média aritmética simples dos quatro diâmetros medidos para o cálculo do INC).

3.7 Orientação do desvio da medula ao longo do tronco

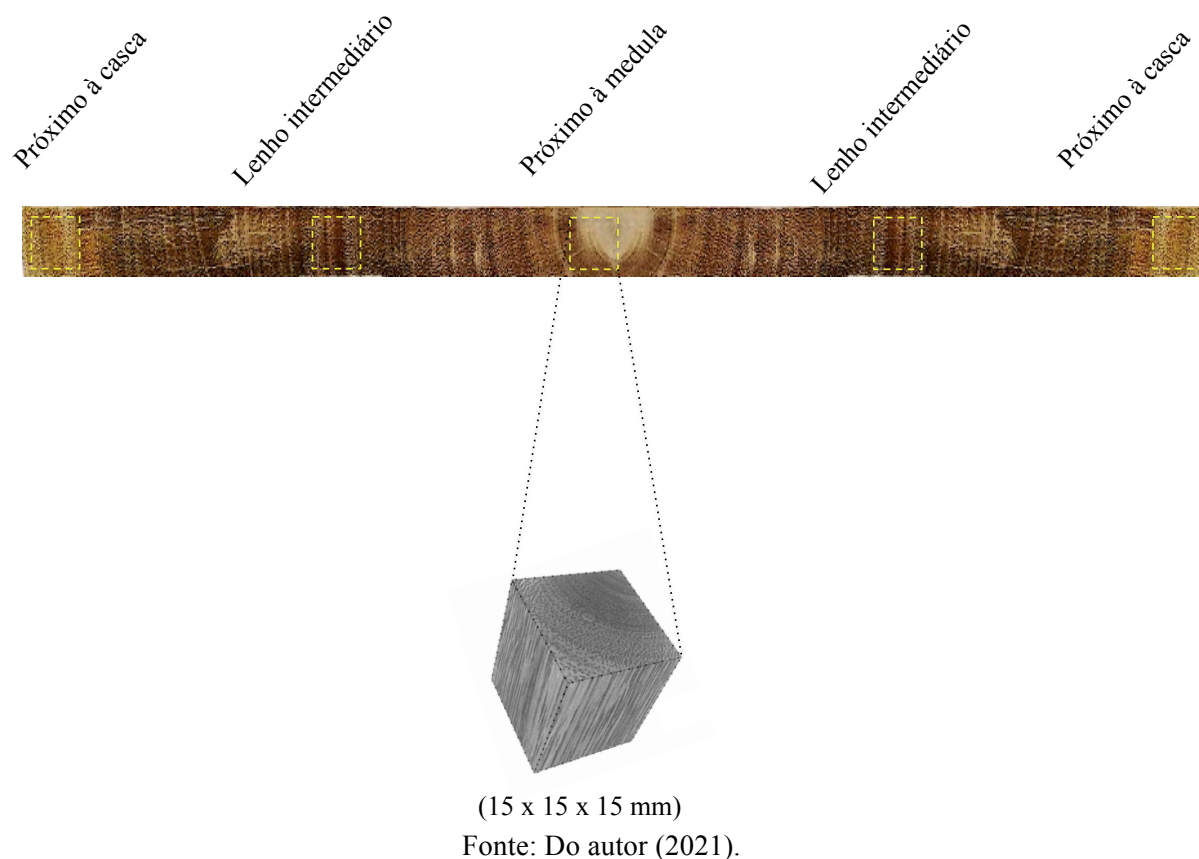
Para demonstrar o desvio da medula e qualquer possível mudança em sua orientação ao longo do caule, foi proposta a reconstrução das seções transversais em suas respectivas alturas de coleta, considerando os formatos dos troncos. Isso só foi possível porque cada orientação cardinal foi marcada primeiro no tronco e depois transferida para cada seção transversal, visando garantir o posicionamento adequado ao longo do tronco.

3.8 Preparo das amostras

Após as medidas das seções transversais para cálculo do índice de não circularidade e excentricidade da medula, foram amostradas seções radiais (largura: 20 mm x altura: 20 mm x comprimento: de acordo com maior diâmetro do disco ou inclinação do tronco) compreendendo a extensão casca-medula-casca. Então, foram mantidas as mesmas posições para amostragem em cada disco, a partir do disco da base, a fim de acompanhar o comportamento do desvio da medula no sentido longitudinal. Após a retirada das seções, as mesmas foram acondicionadas em estufa com ventilação mecânica a aproximadamente 40°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) por 72 h, no mínimo, até a estabilização das massas.

Foram então retiradas cinco amostras (15 x 15 x 15 mm) para cada seção radial com o auxílio de um formão, sendo duas próximas à casca, duas no lenho intermediário e uma próxima à medula nas seções transversais das árvores de tronco ereto (Figura 4). Para as seções radiais que apresentaram desvio na medula (árvores de tronco inclinado), na marcação da região para retirada das amostras do lenho intermediário foram medidas, primeiramente, as distâncias entre medula e casca para ambos os lados (lenho oposto e tração) e o valor correspondente foi então dividido por dois. Com essa informação foi possível fazer a marcação aproximada entre os anéis de crescimento correspondentes para ambos os lados. Dessa forma, as cinco regiões amostradas para as seções radiais das árvores de tronco inclinados foram: uma no lenho de tração, duas nos lenhos intermediários, uma próxima à medula e uma no lenho oposto.

Figura 4 – Exemplo de amostragem (delimitação em amarelo) em uma seção radial de árvore de tronco ereto.



As amostras foram acondicionadas em câmara de climatização (temperatura e umidade relativa do ar controladas) por dois meses para então se prosseguir com as próximas análises.

3.9 Caracterização da parede celular no microscópio eletrônico de varredura (MEV)

Amostras com dimensões de $10 \times 10 \times 2,5$ mm (comprimento x largura x altura) foram confeccionadas com auxílio de formão e serra manual, a partir de duas seções radiais da base. As regiões amostradas foram: a intermediária dos lenhos de tração e oposto da árvore I3 (com maior inclinação) e do lenho normal de uma árvore de tronco ereto (E1), ambas com DAPs similares, para observação do plano transversal das amostras por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo LEO EVO 40 XVP (Carl Zeiss).

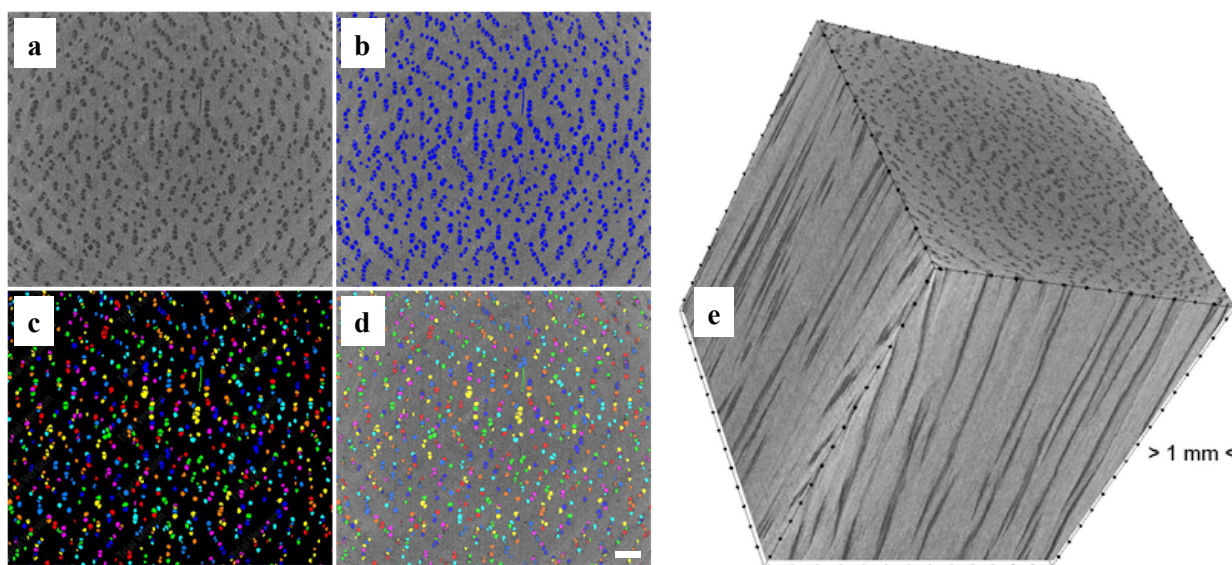
Para tornar o plano transversal das amostras suficientemente liso, visando a obtenção de imagens de qualidade no MEV (15 kV), cortes foram realizados com auxílio de micrótomo de deslize enquanto as amostras ainda estavam saturadas. Após o preparo da superfície, as mesmas foram submetidas ao acondicionamento em câmara climática com umidade relativa do ar de 55% e temperatura de 20°C durante 72 h. Em seguida, o material foi submetido ao banho de ouro em aparelho evaporador de ouro modelo SCD 050 (Bal-Tec).

O objetivo da análise no MEV foi verificar a presença de fibras com camada gelatinosa no lenho de tração e diferenciar os lenhos de tração, oposto e normal com base na conformação das fibras, observadas no plano transversal.

3.10 Microtomografia computadorizada de raios-X (micro-CT)

Após o período de acondicionamento das amostras em câmara de climatização, foi procedida a análise no microtomógrafo computadorizado SkyScan 1172 Micro-CT Brucker®, no laboratório de Mecânica Aplicada – Ångström Laboratoriet da Uppsala University – Suécia. Os procedimentos para obtenção das imagens do corpo de prova foram os seguintes: ajuste da resolução (12,9 µm), voltagem do aparelho de raios X (65 kV), aquisição de “background” e escaneamento da amostra (aproximadamente 1 h). A partir dos dados adquiridos e após processamento no software de imagens Aviso Lite® foram realizadas a contagem das áreas dos elementos de vasos e o cálculo de sua frequência na face transversal no lenho tração, lenho oposto e lenho normal das amostras retiradas próximas à casca para todas as alturas estudadas, seguindo os procedimentos para processamento das imagens (Figura 5 a-d).

Figura 5 – Procedimentos para processamento das imagens: **a** imagem original; **b** delimitação dos elementos de vasos; **c** separação dos elementos de vasos para cálculo da área e frequência; **d** sobreposição de a e c para verificação; **e** visualização tridimensional da amostra.



Legenda: Barra: 1000 μm . Fonte: Do autor (2021).

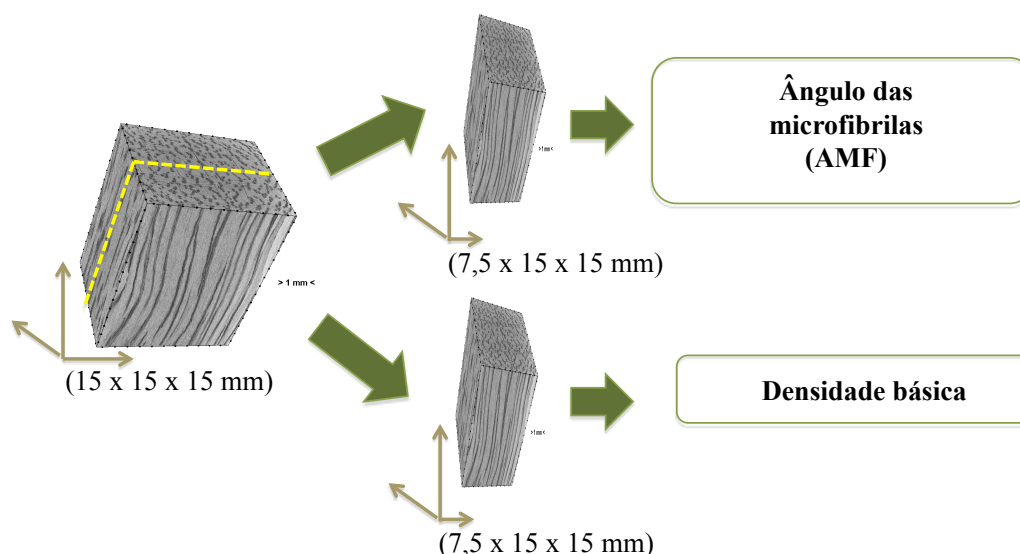
Com os dados obtidos foi possível calcular os valores médios de frequência dos elementos vasos e o valor total médio de sua área em relação aos três tipos de lenho: normal, tração e oposto. Dessa forma, pode-se inferir sobre o investimento em sustentação ou condução de seiva dependendo do tipo do lenho.

Para a formação das imagens tridimensionais (Figura 5e), os softwares NRecon[®] e Data Viewer[®] foram utilizados. Assim, foi possível verificar o comportamento dos elementos de vasos nos sentidos longitudinal, radial e tangencial nas amostras analisadas, permitindo uma comparação entre os lenhos de tração, oposto e normal. Visando conhecer melhor o perfil de distribuição da arquitetura dos elementos de vasos ao longo do fuste, as imagens tridimensionais de Micro-CT foram posicionadas nas respectivas alturas e posições radiais amostradas para comparação.

3.11 Medição do ângulo das microfibrilas (AMF) e densidade básica

Para as análises de densidade básica e ângulo de microfibrilas (AMF) para todas as alturas estudadas foi necessário realizar a divisão das amostras utilizadas na micro-CT, conforme exemplificado na Figura 6.

Figura 6 – Preparo das amostras para determinação da densidade básica e ângulo de microfibrilas (AMF).



Fonte: Do autor (2021).

O método da microscopia de luz polarizada foi empregado para observação do AMF nas diferentes posições radiais e alturas designadas. Para essa análise, de acordo com a metodologia utilizada por Leney (1981) e adaptada por Lima et al. (2004), as amostras foram primeiramente saturadas em água e seccionadas no sentido tangencial em finas camadas de aproximadamente 8 μm de espessura (para garantir a separação das fibras longitudinalmente), depois foram colocadas em solução de ácido acético glacial e peróxido de hidrogênio (35 volumes) em proporção volumétrica de 1:1 para dissociação dos elementos celulares, e então foram levados à estufa por 24 h a 60°C. Após a individualização, as fibras foram lavadas em água destilada pelo menos três vezes e então foram pipetadas para a lâmina de vidro sob uma gotícula de glicerina. Em seguida, foi adicionada a lamínula sobre o conteúdo da lâmina, finalizando o preparo para que fossem feitas as observações.

As lâminas semi-permanentes prontas foram colocadas em mesa giratória com um goniômetro (graduado de 0° a 360°) de um microscópio Olympus BX51 com lentes de polarização, para então serem medidos os AMFs. O procedimento consiste em alinhar a fibra na linha de observação vertical com um dos polarizadores do microscópio, anotar o valor do ângulo inicial da mesa giratória e rotacioná-la até o ponto de máxima extinção de luz da fibra, anotando o valor do ângulo final; por diferença entre os ângulos inicial e final é possível calcular o AMF da fibra; foram efetuadas 20 observações para calcular a média dos dados.

Para a análise de densidade básica, as amostras foram completamente saturadas em água e colocadas sob vácuo. Após a saturação completa foi realizada a medida do volume saturado em balança analítica, utilizando o método da balança hidrostática. Posteriormente, essas amostras foram levadas à estufa a 103°C (± 2 °C) até a estabilização das massas. Depois, medidas as massas secas. Com os valores de massa seca e volume verde foram calculadas as densidades básicas conforme a Equação 3.

$$DB = (M_{sec}/V_{ver}) * 100 \quad \text{(Equação 3)}$$

Em que:

DB : Densidade básica (g.cm^{-3});

M_{sec} : massa seca;

V_{ver} : volume verde.

Com os dados de AMF e densidade básica para cada região amostrada foi possível fazer o mapeamento do perfil dessas propriedades, visando prever o comportamento dessas propriedades na direção radial e longitudinal, além de ser possível realizar o cálculo de correlação entre elas.

3.12 Desenho experimental e análise estatística

Para as análises dos índices de não circularidade e excentricidades da medula, foram definidas três regiões amostradas para cada árvore, sendo: uma na base (0 m), a 3 m e 6m. Considerando que cada árvore continha 3 regiões amostradas (três alturas de amostragem), chegou-se ao total de 18 observações médias para essas duas propriedades analisadas.

Para as análises de densidade básica e ângulo de microfibrilas, foram definidas as regiões amostradas para cada seção radial/altura/árvore analisada, sendo: duas próximas à casca, duas nos lenhos intermediários e uma próxima à medula das árvores de tronco ereto e, duas nos lenhos intermediários, uma próxima à medula, uma no lenho oposto e uma no lenho de tração, para as árvores de tronco inclinado. Assim, cada região representou a média dessas duas propriedades medidas. Considerando que cada árvore continha 15 regiões amostradas (cinco regiões x três

alturas de amostragem), chegou-se ao total de 90 observações médias para essas duas propriedades.

Os dados foram analisados com o software estatístico “R”. As propriedades medidas no lenho foram analisadas pela análise de variância (ANOVA). O teste Tuckey ($\alpha = 0.01$) ou Teste Skott-Knott ($\alpha = 0.05$) foram usados para comparação de médias dependendo da variável analisada. Os dados passaram pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk e o teste de Bartlett de homogeneidade de variâncias. Na análise do grau de associação entre densidade básica e AMF, foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson. Os gráficos foram plotados no Excel ou no software SigmaPlot® e as figuras editadas no Power Point.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados estão apresentados e discutidos partindo-se de uma visão macro do lenho na seguinte ordem: análises da deformação residual longitudinal, índice de não circularidade, excentricidade da medula, orientação do desvio de medula ao longo do tronco e da determinação da densidade básica. Posteriormente, uma visão microestrutural do lenho, por meio das análises do ângulo de microfibrilas, microscópio eletrônico de varredura e das microtomografias computadorizadas de raios-X.

4.1 Deformação residual longitudinal (DRL)

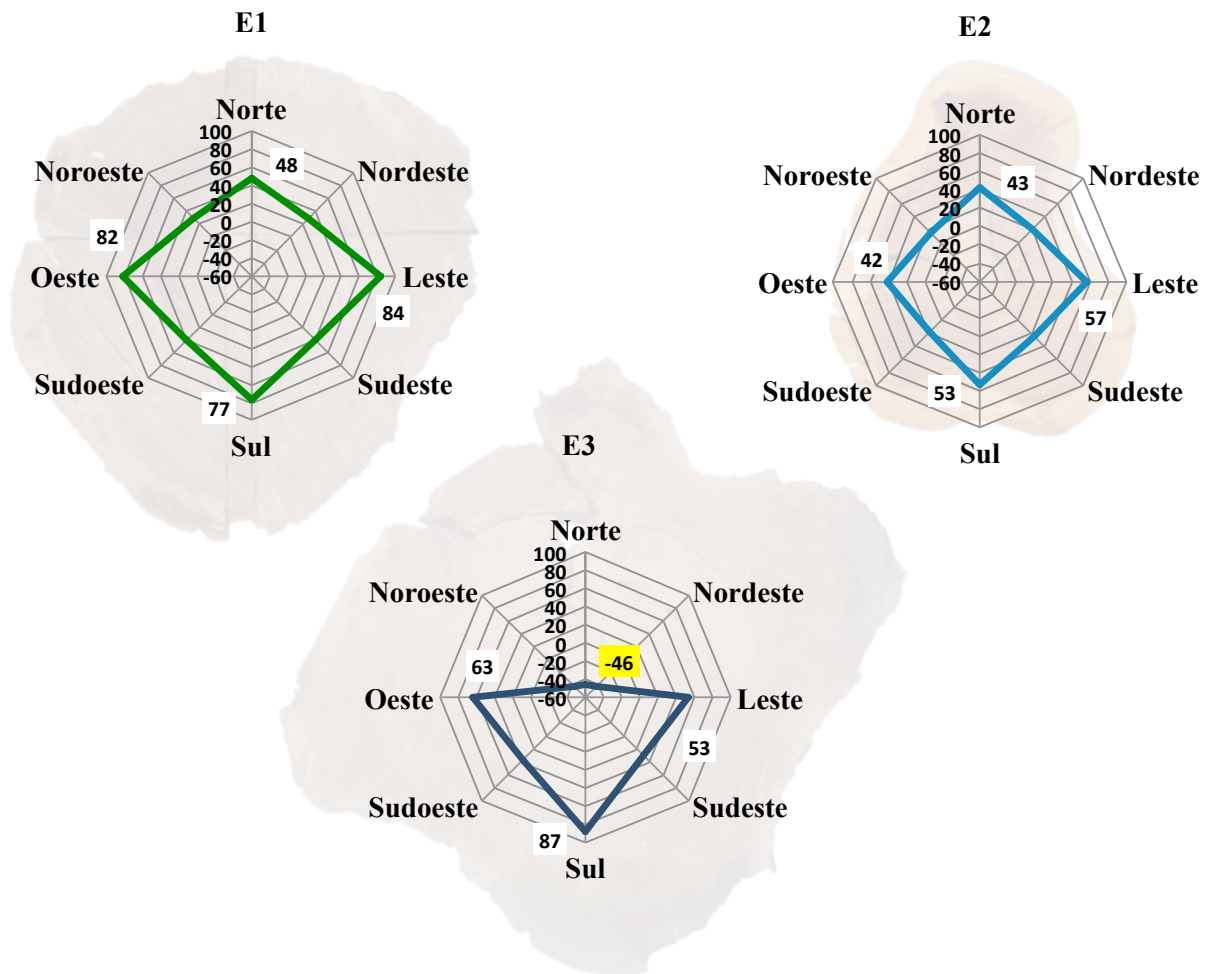
A deformação residual longitudinal (DRL) é a característica que tem sido usualmente medida nas árvores em pé, de forma a avaliar as tensões de crescimento que são exercidas nos troncos. O método do extensômetro empregado tem sido considerado como confiável para aferir as deformações resultantes das tensões em várias pesquisas (BAILLÈRES et al., 1995; Lima et al., 2004; Ruelle et al., 2007; Carvalho et al. 2010).

Considerando que as medidas de DRL foram feitas em árvores em pé de troncos eretos e inclinados, diferentes tensões são identificadas em torno do tronco. Os sinais positivos e negativos de DRL possuem implicação direta na análise de seus resultados. Geralmente, uma árvore de tronco ereto irá apresentar forças de tração na sua superfície, representado por resultados positivos de DRL, assim como no lado tracionado dos troncos inclinados. Contrariamente, forças de compressão podem ocorrer no lado comprimido dos troncos

inclinados, ou em alguns casos, ocorrer até mesmo nas árvores de tronco ereto, representadas por valores negativos de DRL. Além disso, na análise de DRLs opostas em troncos inclinados, pode haver grande amplitude de valores, indicando provável ocorrência de lenho de reação, com o lado comprimido apresentando não necessariamente DRL negativa.

Considerando a distribuição periférica da DRL para cada árvore de tronco ereto (Figura 7), a árvore E1 apresentou DRLs variando de 48 μm (face Norte) a 84 μm (face Leste). Essas DRLs positivas representam forças de tração atuando no tronco com distribuição mais homogênea, apesar de apresentar amplitude de 44 μm entre as faces analisadas. Na árvore E2, as DRLs variam de 42 μm (face Oeste) a 57 μm (face Leste) e, assim como em E1, também apresenta uma distribuição homogênea entre DRLs com menores DRLs comparadas à E1, provavelmente, devido às diferenças entre seus DAPs: 35,49 cm (árvore E2) e de 45,19 cm (árvore E1). Na árvore E3, a maior DRL positiva foi verificada na face Sul (87 μm) e ainda uma DLR negativa encontrada na face Norte (-46 μm) que, apesar de ser ereta, o tronco dessa árvore provavelmente apresenta lenho de reação devido a amplitude de valores entre 87 a -46 μm . A árvore E3 apresentou o maior DAP entre todas as árvores amostradas (60,79 cm) e um formato de tronco mais irregular comparado aos demais. As DRLs para árvores de tronco ereto (Figura 7) corroboram com o intervalo de valores encontrados por Lima et al. (2015), embora algumas delas apresentaram-se abaixo de 51 μm .

Figura 7 – Distribuição periférica das deformações residuais longitudinais (μm) nas árvores de troncos eretos (E1, E2, E3) de *Corymbia citriodora* de acordo com as orientações cardinais e representação da forma dos troncos considerando suas respectivas seções transversais.



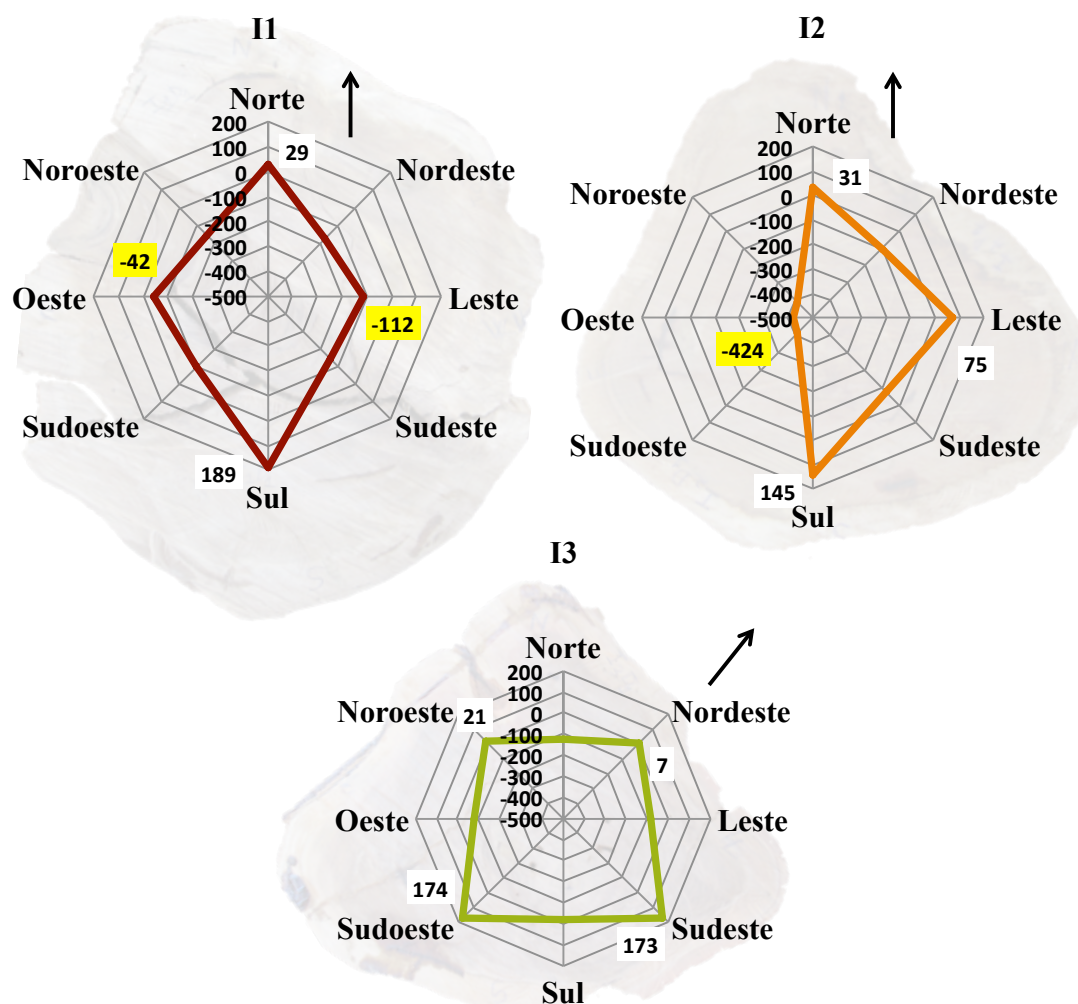
Legenda: O valor de DRL negativo está destacado em amarelo. Fonte: Do autor (2021).

Considerando a relação entre os DAPs e DRLs das árvores analisadas, pode-se observar que com incremento do diâmetro entre a árvore E2 (DAP = 35,49 cm) e a árvore E1 (DAP = 45,19 cm), houve aumento da DRL nos quatro pontos amostrados em torno do tronco. Por outro lado, esse comportamento não foi totalmente elucidado da árvore E1 (DAP = 45,19 cm) para a árvore E3 (DAP = 60,79 cm) devido à DRL negativa na face norte de E3, que desequilibrou as medidas de DRL adjacentes (Figura 7). Essa DRL negativa indica que o lenho sofreu forças de compressão na face Norte e, considerando a grande amplitude entre os valores medidos na sua face oposta (Sul), sugere a ocorrência de lenho de tração.

Em relação à distribuição periférica de DRL de árvores de tronco inclinado (Figura 8), a árvore I1 apresentou grande amplitude de DRL entre faces opostas (Norte e Sul), justamente no sentido em que I1 encontrava-se inclinada para o norte. Essa constatação indica a ocorrência de lenho de tração nesta árvore. Outro fator notável foi respectivo aos valores negativos de DRLs

nas faces perpendiculares (Leste e Oeste). Nesse sentido, a árvore I1 apresentou forças de compressão que provavelmente se desenvolveram em resposta à manutenção do seu equilíbrio dinâmico devido ao desenvolvimento de forças opostas nas faces Norte e Sul. Na árvore I2 foi encontrada na face Oeste a maior DRL negativa (-424 μm), evidenciando a presença de forças de compressão. Apesar de ter o menor DAP (42,65 cm) entre todas as árvores inclinadas, a presença de bolsas de resinas (kinos) nesta face, indicando injúrias mecânicas, podem ter contribuído para esse resultado negativo.

Figura 8 – Distribuição periférica das deformações residuais longitudinais (DRL, μm) nas árvores de troncos inclinados (I1, I2, I3) de *Corymbia citriodora* de acordo com as orientações cardeais e a representação da forma dos troncos considerando suas respectivas seções transversais.



Legenda: As setas indicam a orientação de inclinação das árvores. Os valores de DRL negativos estão destacados em amarelo. Fonte: Do autor (2021).

As DRLs positivas mais elevadas nas árvores com tronco inclinado (Figura 8), 189 μm (I1), 145 μm (I2) e 173 μm (I3), foram todas encontradas nas porções tracionadas do caule, nas faces Sul e Sudeste. Essas DRLs foram cerca de 6, 4 e 8 vezes maiores, respectivamente, do que as DRLs opostas, 29 μm (I1), 31 μm (I2) e 21 μm (I3), encontradas nas faces Norte - N (I1, I2) e Noroeste - NO (I3).

Embora, não tenham ocorrido valores de DRLs negativos no lado comprimido dos troncos inclinados (face Norte), eles apresentaram grande amplitude considerando a diferença entre as medidas opostas de DRL, indicando grandes tensões dentro do tronco e, consequentemente, provável existência de lenho de tração.

Notam-se padrões irregulares na distribuição das DRLs em torno dos troncos das árvores inclinadas (Figura 8), o que dificulta a determinação precisa de tendência no comportamento das DRLs associada ao diâmetro da árvore amostrada. Isso pode explicar a diferença de comportamento entre as árvores I2 e I3, por exemplo, em que possuíam valores de DAPs próximos: 42,65 cm e 45,51 cm (Tabela 1), respectivamente, porém, esses troncos apresentavam distribuição de DRL diferente em todas as faces avaliadas. Neste evento, é possível que o ângulo de inclinação do tronco tenha sido o fator determinante nas DRLs, pois embora I2 e I3 tenham valores de DAP semelhantes, a amplitude entre os ângulos de inclinação dos troncos foi de 6° (Tabela 1).

Considerando a classificação de toras para processamento de madeira ou laminação, a DRL pode estar relacionada, por exemplo, com a rachadura da tora e a retratibilidade da madeira (SOUZA et al. 2003; TRUGILHO; OLIVEIRA, 2008; BELTRAME et al., 2015). Com base nos resultados obtidos (Tabela 1; Figura 7), podemos indicar que a árvore E2, que apresentou menores valores de DAP e DRL, é menos propensa a rachaduras, e possivelmente terá maior rendimento na serraria. Por outro lado, todas as árvores de tronco inclinado poderão apresentar alta incidência de rachaduras nas toras, não apenas pelos maiores valores de DRL encontradas, mas também por sua distribuição assimétrica de DRLs ao redor do caule, conforme visto em I2 (Figura 8).

Caso as árvores apresentem elevadas DRLs, uma possível redução dos potenciais defeitos ocasionados pela liberação dessas tensões após a colheita e início da secagem da tora, é a utilização de métodos de desdobro apropriados (YANG, WAUGH, 2001). Segundo os autores, o uso de serras múltiplas no desdobro da tora, por exemplo, permite uma liberação simultânea das

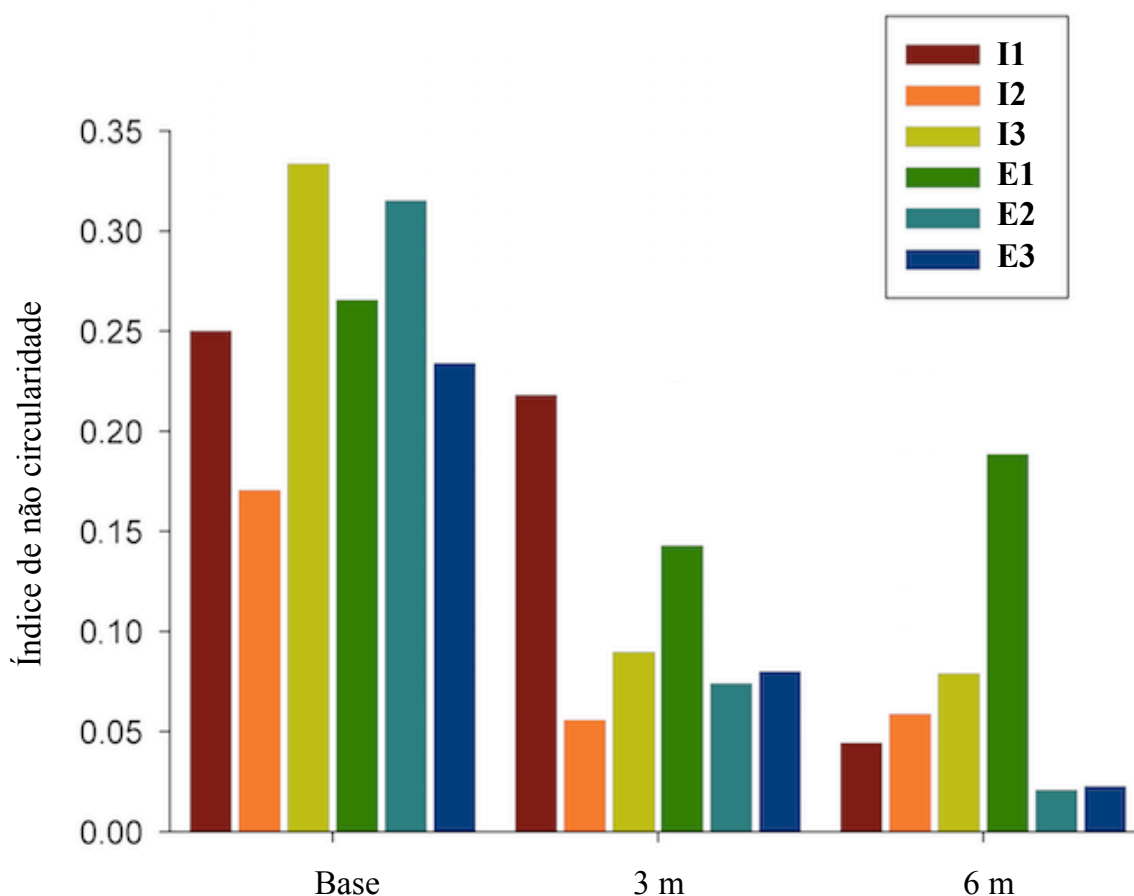
tensões nas linhas de corte ao longo de toda extensão da tora. Entretanto, é importante ressaltar que a tendência de rachaduras nas toras não é apenas uma consequência da intensidade das tensões aplicadas a ela, mas também do conjunto da estrutura física, química, anatômica e, principalmente, mecânica do lenho.

4.2 Índice de não circularidade (INC)

O índice de não circularidade (INC) é representado por valores que variam entre zero e um, sendo que quanto mais próximo de zero, mais circular é a seção transversal do tronco analisado. A precaução em se medir 4 diâmetros para cálculo do INC foi tomada, pois em alguns casos, realizando-se apenas as medições de D_1 e D_2 , em um tronco de formato irregular (Figura 3c), adotando o procedimento proposto por Williamson (1975), esses dois diâmetros podem apresentar quase os mesmos valores, indicando, imprecisamente, que uma forma irregular de tronco é circular. Com essa abordagem evita-se também a utilização do cálculo do índice proposto por Debell e Gartner (1997), composto por medições complexas de diâmetro em troncos de formato irregular.

Os resultados de INCs variaram de 0,02, encontrado em uma das árvores de tronco ereto, a 6 metros de altura, até 0,33, encontrado na base de uma das árvores de tronco inclinado conforme pode-se observar na Figura 9. A tendência geral foi de diminuição do INC da base em direção à altura de 6 m, exceto para a árvore E1 que apresentou um incremento de INC considerando os valores encontrados de 3 para 6 m de altura, e também para I2, que teve aumento do INC para as mesmas alturas de amostragem.

Figura 9 – Índices de não circularidade (INC) de acordo com a altura de amostragem nos tipos de tronco de *Corymbia citriodora*.



Fonte: Do autor (2021).

Após a aplicação da análise de variância (ANOVA) (Tabela 2), considerando todos os INCs, constatou-se que o efeito da altura de amostragem foi significativo. No entanto, não houve diferença entre os INCs para os dois tipos de tronco, assim como não houve efeito significativo da interação do tipo de tronco $\times$ altura de amostragem.

Tabela 2 – Efeito da forma do tronco, altura de amostragem e suas interações com o índice de não circularidade (INC) de *Corymbia citriodora*.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	pr (>F)
Tipo de tronco (E/I)	1	0,000089	0,0197	0,8908278 ^{ns}
Altura de amostragem	2	0,062117	13,7359	0,0007895 *
Tipo de tronco $\times$ altura de amostragem	2	0,001106	0,2445	0,7869249 ^{ns}
Resíduo	12	0,004522		

CV (%)	45,85
--------	-------

‘*’ 0,01; ^{ns} (não significativo); E (árvore de tronco ereto); I (árvores de tronco inclinado); CV: Coeficiente de variação.

Além disso, considerando que a altura de amostragem foi a única fonte de variação que apresentou diferença significativa para a propriedade avaliada, o teste Tukey de comparação de médias foi realizado (Tabela 2) sendo possível agrupá-los em duas categorias diferentes: da base, com maiores INCs, variando de 0,17 a 0,33; e o conjunto de INCs de três e seis metros, sendo classificados como um grupo de INCs mais baixos, variando de 0,02 a 0,22.

Todas as árvores amostradas apresentaram formato de tronco assimétrico na base devido ao espessamento basal, em maior ou menor proporção, responsável por fornecer maiores INCs - INC médio de 0,26; para 3 m acima da base, o formato do tronco apresentou menores valores de INC - INC médio de 0,08 - aproximando-se da forma mais circular. Os resultados de INC (Figura 9) evidenciaram que os formatos do tronco nas partes inferiores foram mais irregulares do que aqueles com alturas de amostragem mais altas do tronco, corroborando com os resultados encontrados por Singleton et al. (2003) e Fallah et al. (2012).

O espessamento basal é uma das estratégias utilizadas pelas árvores para se manterem em equilíbrio próximas à posição vertical, além da sinuosidade dos troncos (MATTHECK; KUBLER, 1997). Entretanto, nenhuma sinuosidade foi evidenciada nos troncos desse estudo.

Considerando o processamento da madeira, toras com INCs mais altos são difíceis de serem desdobradas, resultando em perdas de conversão em madeira serrada. Porém, espessamentos irregulares na base do tronco ajudam a árvore a equilibrar seu próprio peso, considerando todas as influências externas que atuam na superfície do tronco, representando uma resposta biológica para proporcionar melhor ancoragem por meio dessas extensões radiculares acima do solo.

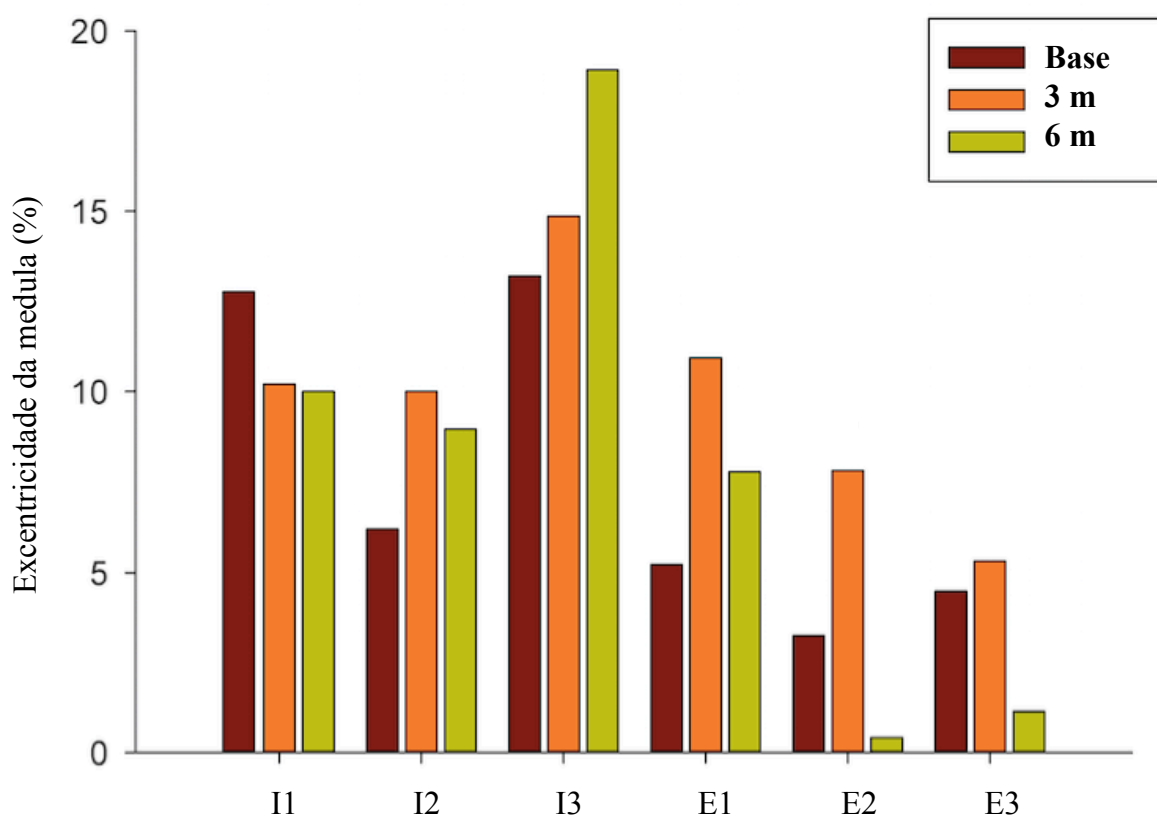
4.3 Excentricidade da medula (EM)

A excentricidade da medula (EM) representa, em porcentagem, o quanto excêntrica é a medula, considerando seu desvio do centro geométrico (G) em relação ao diâmetro médio da seção transversal amostrada. Geralmente, troncos com maior EM possuem formato mais elíptico ou irregular, mas também não é raro encontrar troncos circulares com alguma EM, de acordo com

os INCs mostrados na Figura 9.

Os valores de EM variaram entre 0,42% e 18,92% (Figura 10). Considerando as alturas de amostragem usadas, as árvores de tronco ereto tiveram em geral tendência de aumento da EM da base para 3 m, e depois, de 3 a 6 m um decréscimo de seus valores. Em relação às árvores de tronco inclinado, esse mesmo padrão foi observado apenas para a árvore I2, enquanto a árvore I1 apresentou tendência de diminuição conforme o ganho em altura. A árvore I3, pelo contrário, teve aumento da EM ao longo do tronco analisado. Essas mudanças na EM revelam padrões distintos na orientação de desvio da medula ao longo do tronco, os quais estão discutidos no tópico subsequente.

Figura 10 – Excentricidade da medula de acordo com a altura de amostragem nos tipos de tronco de *Corymbia citriodora*.



Fonte: Do autor (2021).

Considerando todas as excentricidades da medula, após a aplicação de ANOVA (Tabela 3), o efeito dos tipos de troncos foi significativo, mas não houve diferença entre as alturas de amostragem. Além disso, não houve diferença na interação tipo de fuste x altura de amostragem.

Tabela 3 - Efeito da forma do tronco, altura de amostragem e suas interações com a excentricidade da medula de *Corymbia citriodora*.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	pr (>F)
Tipo de tronco (E/I)	1	191,362	14,6422	0,002411 *
Altura de amostragem	2	9,510	0,7276	0,503196 ^{ns}
Tipo de tronco × altura de amostragem	2	12,833	0,9819	0,402778 ^{ns}
Resíduo	12	13,069		
CV (%)	42,93			

‘*’ 0,01; ^{ns} (não significativo); E (árvore de tronco ereto); I (árvores de tronco inclinado); CV: coeficiente de variação.

A partir do resultado da análise de variância (Tabela 3), as árvores foram agrupadas em duas categorias diferentes: árvores de tronco inclinado, com maiores valores de EMs - variando de 6,21% a 18,92% - e árvores de tronco ereto, com menores EMs - variando de 0,42 a 10,94% (Figura 10). Considerando que não houve diferença entre as alturas de amostragem, as árvores de tronco inclinado foram consideradas como de medula mais excêntrica - EM médio de 11,68% - em comparação com árvores de tronco ereto - EM médio de 5,16%.

Excentricidades da medula mais elevadas são resultados típicos nos troncos de árvores inclinadas, pois devido à formação de lenho de tração, seu formato torna-se assimétrico, desviando a medula de sua posição geométrica (RUELLE, 2014). Porém, notou-se também uma relevante média de EM, mesmo para árvores de tronco ereto (5,16%). Mesmo árvores que cresçam em terrenos planos podem produzir medulas excêntricas devido às cargas constantes dos ventos atuando na formação do caule, ou até mesmo devido a competição por radiação solar, o que provavelmente aconteceu com as árvores analisadas devido ao direcionamento das copas para o sentido Norte. Esses resultados corroboram com Washusen, Ades e Vinden (2002) e Ferreira et al. (2008).

Os valores médios de EM para árvores de troncos inclinados e eretos, 11,68 e 5,16%, respectivamente, estão condizentes com os intervalos de valores encontrados por Radomski e

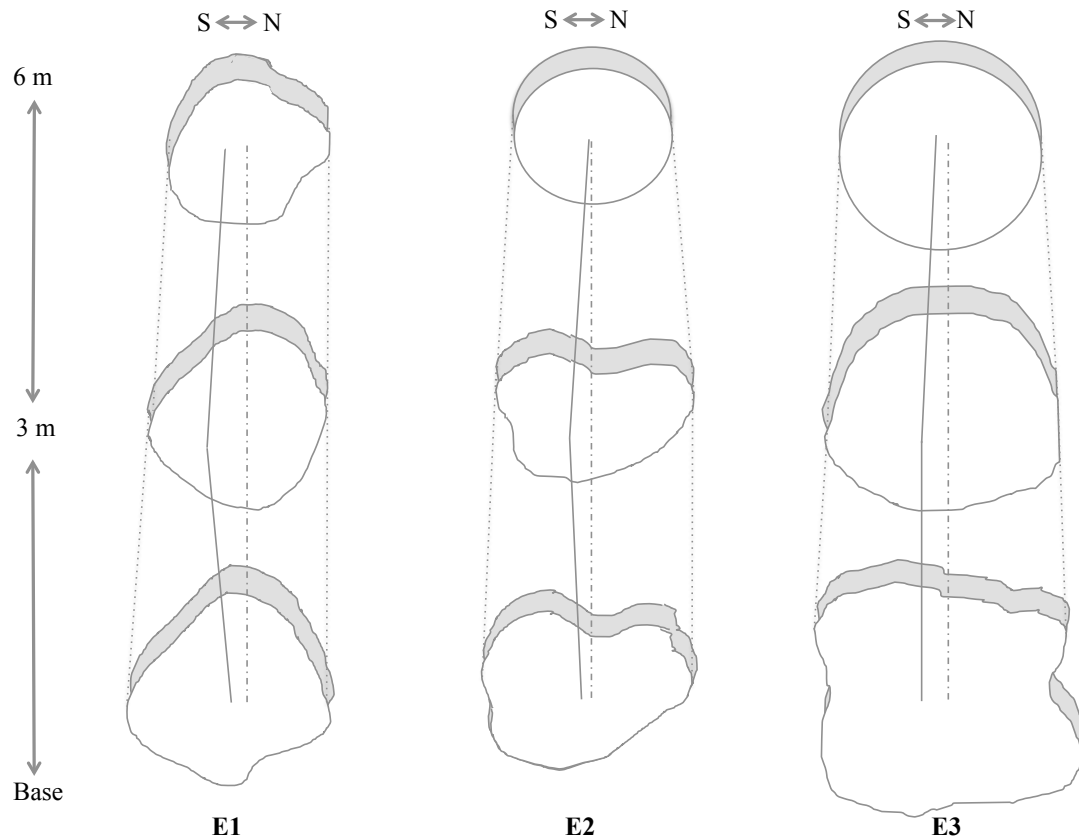
Ribaski (2010), para a mesma espécie, apesar dos espaçamentos e idades serem diferentes entre os estudos.

4.4 Orientação do desvio de medula ao longo do tronco

O desvio da medula refere-se à distância radial entre a medula (M) e o centro geométrico do disco (G). À medida que o caule se desenvolve assimetricamente, a medula tende a se deslocar de seu centro geométrico, e analisando os desvios no sentido longitudinal, podemos prever possíveis mudanças na orientação da medula dentro do tronco.

Apesar de não haver diferenças estatísticas entre EMs para as alturas de amostragem dentro de cada grupo de tipo de tronco (Tabela 3), foram encontrados diferentes padrões de desvio da medula ao longo do tronco, considerando mudanças na sua orientação. Os resultados de orientação do desvio da medula para cada tipo de tronco estão representados nas Figuras 11 e 12.

Figura 11 - Desvio de medula ao longo da altura de árvores de tronco ereto (E1, E2, E3) representados pelas linhas cheias, que atravessam cada seção transversal de *Corymbia citriodora*, e pelas linhas tracejadas, que representam o alinhamento dos centros geométricos das seções transversais.

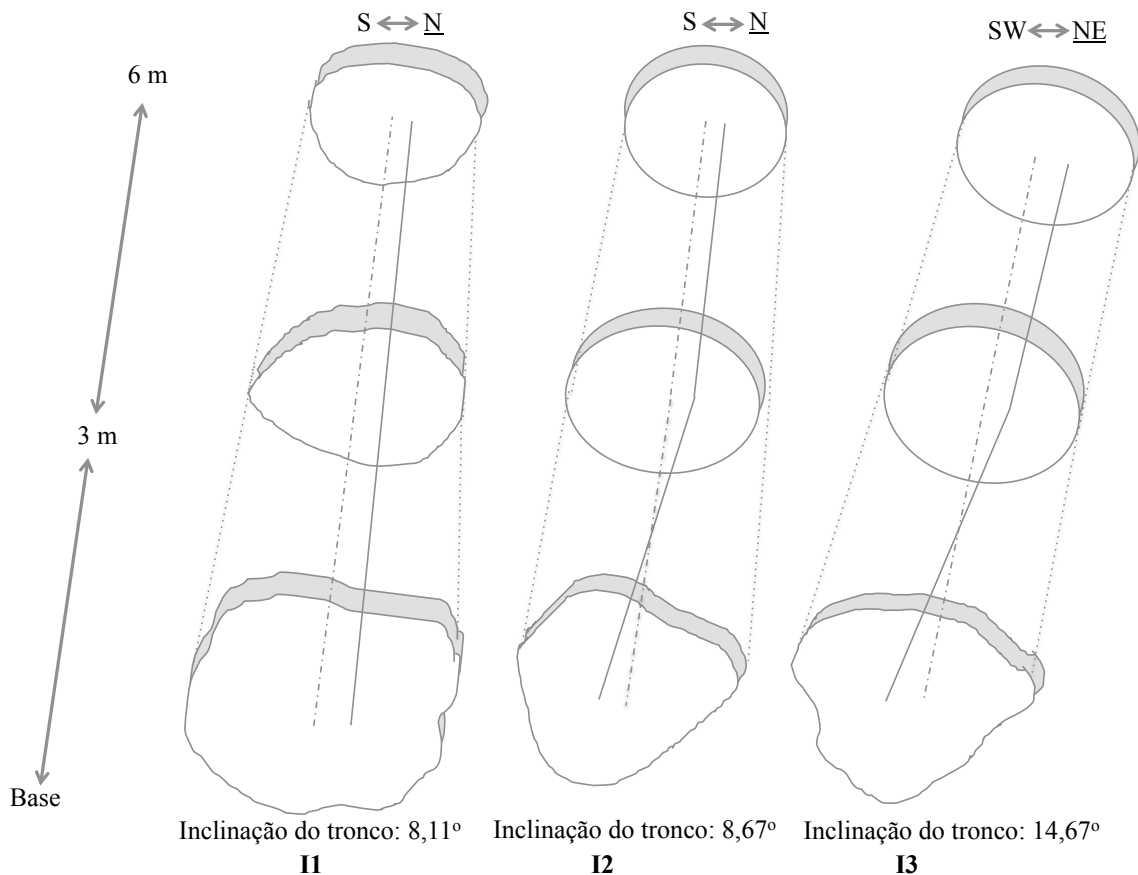


Legenda: SW – Sudoeste; NE – Nordeste. Fonte: Do autor (2021).

Com base nos resultados, foi assumido um padrão na orientação de mudança dos desvios da medula ao longo do tronco (Figura 11). Analisando-se a direção Sul (S) - Norte (N), da base até a altura de três metros, as medulas de todas as árvores eretas (E1, E2 e E3) desviaram para o sentido Sul e depois mantiveram a orientação, de três para seis metros, para a face S.

Em relação ao desvio da medula ao longo da altura das árvores de tronco inclinado (Figura 12), considerando-se seu comportamento da base até a altura de 3 m, a árvore I1 manteve a mesma orientação no sentido Norte (N), mas para as árvores I2 e I3, observou-se a mudança abrupta da face Sul (S) para as faces N e Nordeste (NE), respectivamente. Além disso, de três a seis metros de altura, para todas as árvores de tronco inclinado, mantiveram a orientação no sentido do N (I1 e I2) e NE (I3).

Figura 12 - Desvio de medula ao longo da altura de árvores de tronco inclinados (I1, I2, I3) representados pelas linhas cheias, que atravessam cada seção transversal de *Corymbia citriodora*, e pelas linhas tracejadas, que representam o alinhamento dos centros geométricos das seções transversais.



Legenda: orientações grifadas representam o sentido da orientação dos troncos das árvores inclinadas: S – Sul, N – Norte, SW – Sudoeste; NE – Nordeste. Fonte: Do autor (2021).

As alterações de orientação no desvio de medula são influenciadas pelo equilíbrio dinâmico das tensões de crescimento que atuam ao longo do tronco para manter a árvore em pé próxima ao posicionamento ereto. Diante disso, mesmo uma árvore de tronco ereto pode apresentar desvio da medula em menor magnitude (Figura 11), assim como já foram observadas árvores de troncos eretos em terrenos inclinados mas que formaram lenho de reação (HEIN et al., 2015). Por isso é importante se conhecer as causas do lenho de reação, pois não somente a gravidade, mas outros fatores podem estar envolvidos. Possíveis desvios da medula ao longo do tronco são indícios de que processos de reorientação dos troncos devido a ventos constantes, copas irregulares ou competição por radiação solar podem estar ocorrendo com maior intensidade.

Se considerarmos as formas do tronco nas bases para todas as árvores de tronco inclinado amostradas (Figura 12), notamos que I1 apresentou forma mais elíptica que I2 e I3, nos troncos com espessamento basal pronunciado. Isso pode explicar essas diferentes mudanças de orientação do desvio da medula para árvores de tronco inclinado, em que a transição entre a forma irregular de tronco na base para a forma mais circular, à altura de três metros para árvores I2 e I3, pode ser o fator determinante na orientação do desvio da medula. Esse mesmo padrão na orientação do desvio da medula foi observado por Constant et al. (2003). Além disso, Ferreira et al. (2008) observaram que no DAP de clones de *Eucalyptus sp.*, a orientação da medula ocorreu contrária à inclinação do local, ou seja, o incremento do lenho oposto na base foi maior do que o lenho de tração, provavelmente porque outros fatores, como o vento, tiveram efeito maior do que a inclinação do caule, o que representa a tendência próxima ao comportamento encontrado nas bases de I2 e I3.

Considerando a tendência da orientação da medula em I2 e I3 ao longo do tronco (Figura 12), podemos inferir que as árvores inclinadas tendem a produzir mais lenho oposto para formas irregulares na base do tronco para fornecer sustentação adequada no lado da compressão do caule. No entanto, essa proporção de lenho de tração/oposto muda quando o caule atinge determinada altura. Isso ocorre devido à reorientação do tronco para a posição vertical, a qual percebemos pelas mudanças de orientação do desvio da medula. Esse foi o resultado mais importante no que diz respeito ao controle postural do lenho tracionado devido à falta de informações sobre esse comportamento para esse tipo de lenho de reação, principalmente para *C. citriodora*, uma angiosperma com poucos estudos sobre esse tema. As árvores inclinadas não

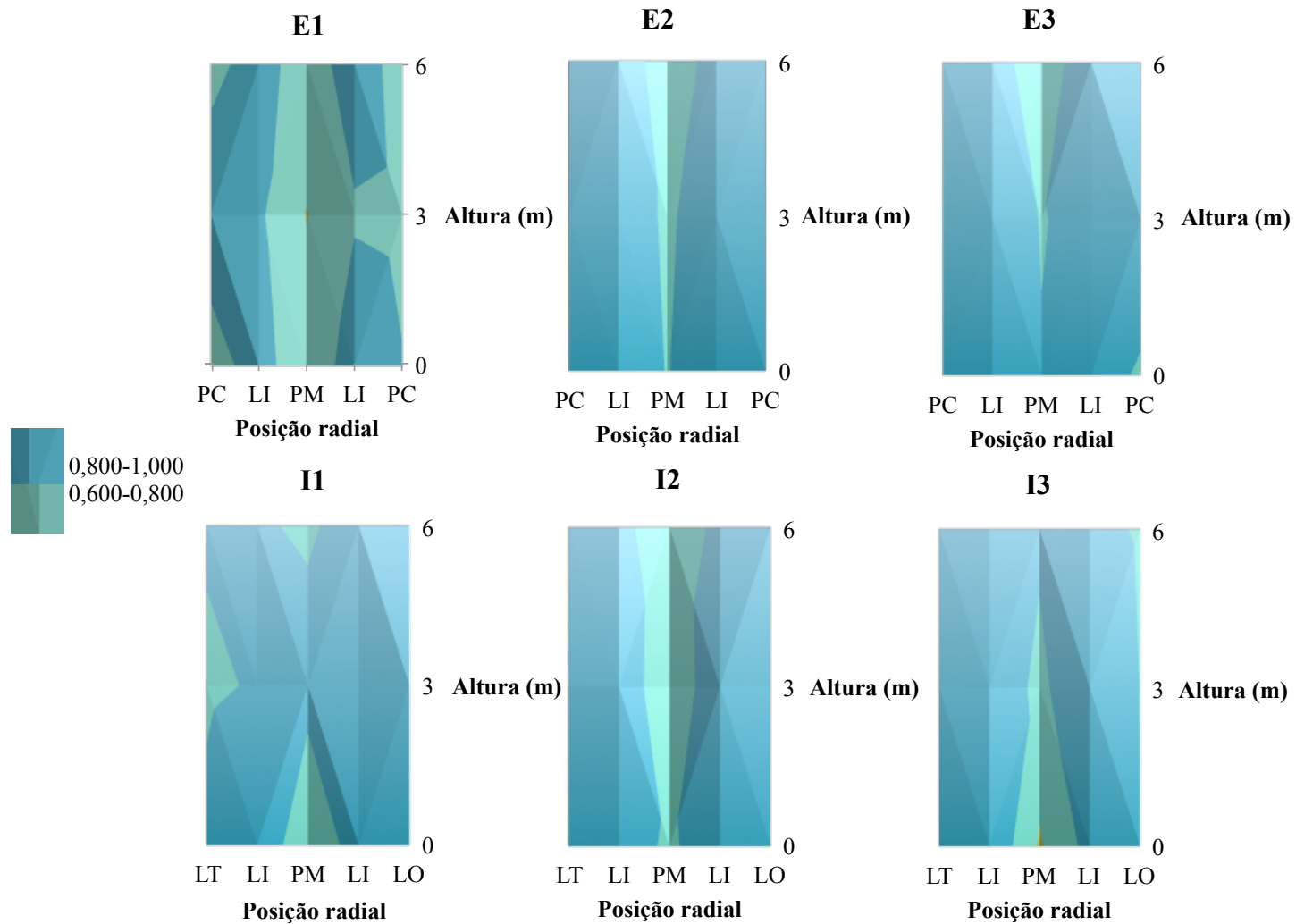
seguiram padrão único de mudança de orientação de desvio da medula, mostrando que no movimento de reorientação dos troncos de ambas as formas irregulares do caule nas bases (I2 e I3) ocorreu até a altura de três metros, enquanto a forma elíptica do caule na base (I1) manteve sua orientação de desvio da medula ao longo do tronco. Isso significa que o movimento de reorientação de I1 determinou uma proporção constante entre lenho de tração e oposto ao longo do tronco, e de alguma forma, seu formato do caule com menor espessamento basal em relação às demais, determinou essa diferença entre os padrões. Possivelmente, esse tipo de reatividade resulta do aumento da rigidez que acompanha o crescimento da árvore em que, quanto mais espesso o tronco, mais difícil o movimento de reorientação e mais lenta a reação do lenho, corroborando (DASSOT et al., 2012).

4.5 Densidade básica

Os perfis de distribuição da densidade básica sofreram variação de uma árvore para outra conforme a altura e posição radial analisada (Figura 13). O comportamento foi semelhante entre E2 e E3, porém variou para E1, para a qual também observam-se regiões menos densas, variando de 0,600 a 0,800 g.cm⁻³, não apenas próximas à medula, mas também nas regiões próximas à casca nas diferentes alturas amostradas, porém em menor proporção.

Em relação às árvores de tronco inclinado, o perfil de I2 foi semelhante à I3, com regiões menos densas próximas à medula e com aumento de densidade nas regiões do lenho intermediário e próximas à casca. A árvore I1 apresentou comportamento de distribuição de densidade semelhante à E1.

Figura 13 - Perfil de distribuição de densidade básica (g.cm^{-3}) para as árvores de *Corymbia citriodora* de acordo com altura e posição radial amostradas.



Legenda: PC - Próximo à casca; LI - Lenho intermediário; PM - Próximo à medula; LT - Lenho de tração; LO - Lenho Oposto. Tons mais escuros representam os maiores valores dentro de cada intervalo. Fonte: Do autor (2021).

Os resultados das análises de variância para a densidade básica estão resumidos na Tabela 4. Observa-se que os valores de densidade básica diferiram estatisticamente apenas de acordo com a posição radial do tronco analisada, ao contrário da altura da amostragem, do tipo de tronco e interações, que não sofreram efeitos significativos.

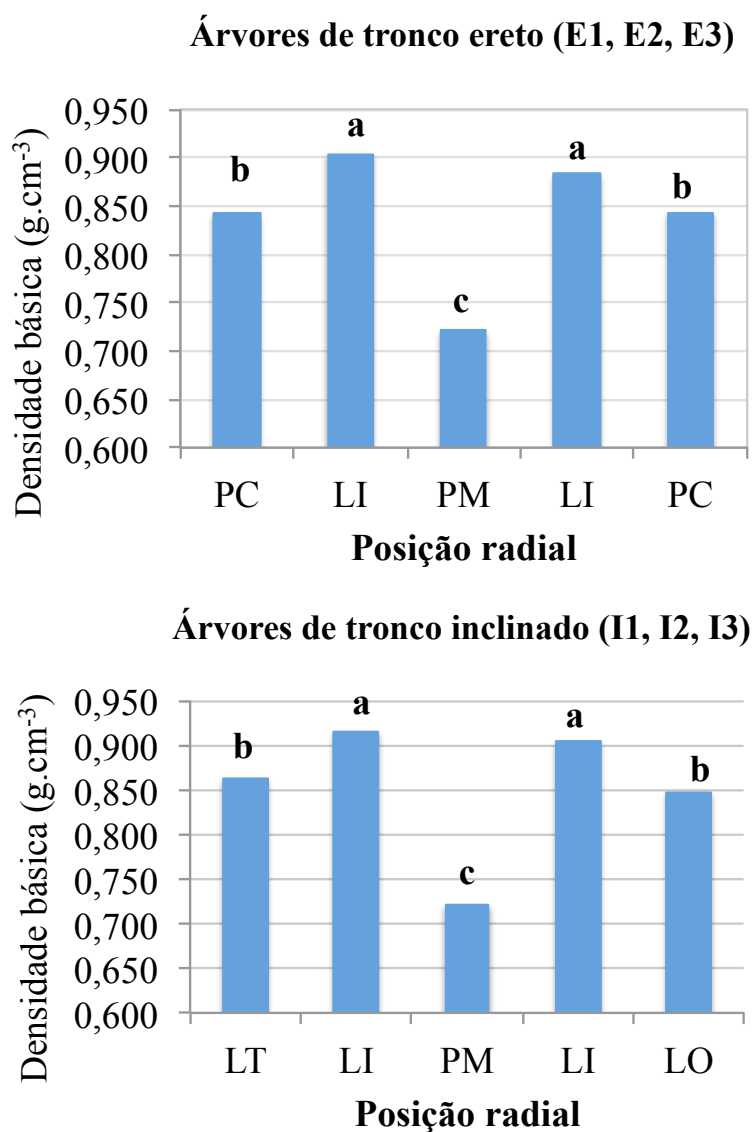
Tabela 4 – Quadro de resumo das análises de variância (ANOVA) para densidade básica de *Corymbia citriodora*.

ANOVA individual (sem interação entre as fontes de variação)				
	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	Pr(>F)
Altura da amostragem	2	0,024855	2,152	0,317 ^{ns}
Tipo de tronco	1	0,002351	0,204	0,696 ^{ns}
Resíduos	2	0,011550		
Interação tipo de tronco x altura da amostragem				
	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	Pr(>F)
Altura da amostragem	2	0,004608	1,685	0,245 ^{ns}
Tipo de tronco x altura da amostragem	2	0,003524	1,289	0,327 ^{ns}
Resíduos	8	0,002735		
Interação Altura da amostragem x posição radial				
	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	Pr(>F)
Posição radial	8	0,04958	13,062	8,89 ⁻¹⁰ *
Altura da amostragem x posição radial	16	0,00327	0,862	0,613 ^{ns}
Resíduos	48	0,00380		

* 0,01; ^{ns} (não significativo).

Os valores médios do conjunto total de dados e teste de Scott-Knott para densidade básica (Figura 14) estão representados de acordo com a posição medula-casca: próximo à casca, região intermediária e próximo à medula, para árvores de tronco ereto (E1, E2, E3); e lenho de tração/oposto, lenho intermediário e próximo à medula, para árvores de tronco inclinado (I1, I2, I3).

Figura 14 – Valores médios de densidade básica para as árvores de tronco ereto (E1, E2, E3) e de tronco inclinado (I1, I2, I3) de *Corymbia citriodora*.



Legenda: PC - Próximo à casca; LI - Lenho intermediário; PM - Próximo à medula; LT - Lenho de tração; LO - Lenho Oposto. Letras iguais não se diferem estatisticamente pelo teste Scott-Knott (5%). Fonte: Do autor (2021).

Considerando o conjunto dos dados analisados, uma vez que houve diferença estatística apenas entre as posições radiais (Tabela 4), nota-se que para os dois tipos de tronco avaliados, a região próxima à medula tende a ser menos densa, com valor médio próximo de 0,721 g.cm⁻³; para as regiões próximas à casca ou lenhos de tração e oposto (no caso dos troncos inclinados), os valores médios de densidade variam entre 0,842 e 0,863 g.cm⁻³; e as regiões de lenho

intermediárias tiveram as densidades médias variando entre 0,883 e 0,915 g.cm⁻³, sendo, portanto, as regiões mais densas. Os valores médios encontrados para densidade básica para ambos tipos de tronco corroboram com os resultados obtidos por Lourençon et al. (2013) para mesma espécie e idade empregadas neste trabalho.

Entretanto, os resultados de densidade básica entre o lenho de tração e oposto, considerados estatisticamente iguais nesse estudo, divergem dos resultados observados por Boschetti et al. (2017) para híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, nos quais a densidade básica do lenho de tração foi 11% maior que o lenho oposto. Provavelmente, essas diferenças entre os estudos ocorreram devido não apenas pela diferença entre os materiais genéticos, mas também pelas idades dos lenhos analisados, sendo juvenil (6 anos) e com maior variabilidade de densidade em Boschetti et al. (2017), e lenho adulto (60 anos) com menor variabilidade da densidade básica para *C. citriodora* nesse estudo.

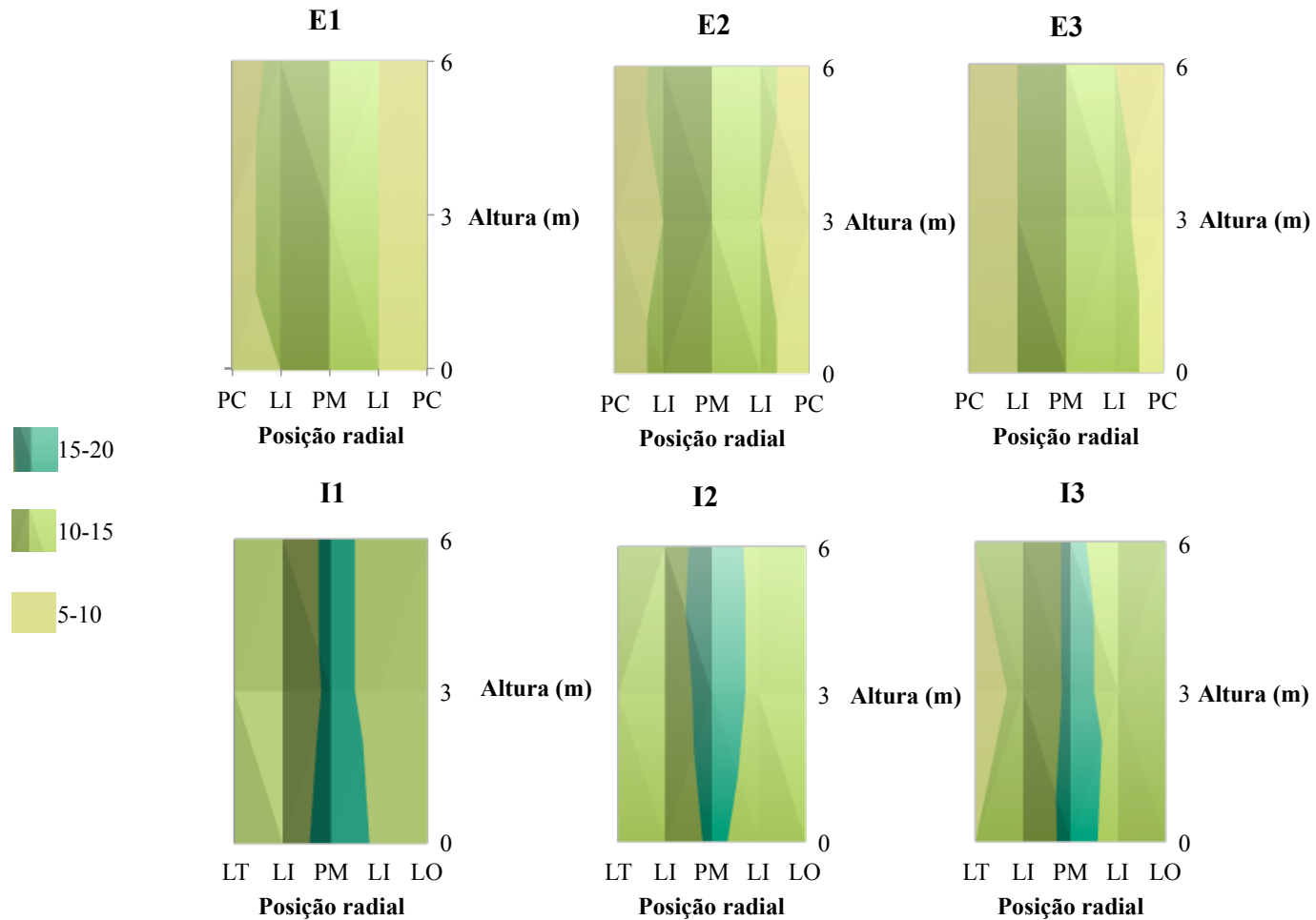
4.6 Ângulo das microfibrilas (AMF)

O ângulo das microfibrilas é uma medida média entre a orientação das microfibrilas celulósicas presentes nas camadas da parede celular, sendo mais evidente na camada S2, e o eixo longitudinal da fibra. A variação do AMF nas diferentes posições radiais e longitudinais do tronco nos permite analisar o comportamento da formação do lenho normal e possível ocorrência de lenho de reação.

Considerando o perfil de distribuição do ângulo das microfibrilas (Figura 15), pode-se estimar os comportamentos nos sentidos radial e longitudinal do tronco para cada árvore. Observa-se que as árvores de troncos eretos (Figura 15) mantêm padrão semelhante entre si, sendo a região próxima à medula com maior AMF (10 a 15°), devido a presença de lenho juvenil, e as regiões próximas à casca com menor AMF (5 a 10°).

O mesmo ocorre com as árvores de troncos inclinados (Figura 15), porém os valores de AMF próximo à medula foram maiores (15 a 20°) comparados aos AMFs das árvores eretas e diminuíram nas regiões intermediárias e próximas à casca (10 a 15°). Nota-se, ainda, que para a árvore I3 (Figura 15) há decréscimo do AMF próximo à altura de três metros na face tracionada do tronco (lenho de tração), provavelmente devido à maior inclinação dessa árvore comparada com as demais (I2 e I1), o que causou aumento das forças de tração nessa região, induzindo à formação de menor AMF para sustentar essa porção tracionada do tronco.

Figura 15 – Perfil de distribuição do ângulo de microfibrilas ($^{\circ}$) para as árvores de *Corymbia citriodora* de acordo com altura e posição radial amostradas.



Legenda: PC - Próximo à casca; LI - Lenho intermediário; PM - Próximo à medula; LT - Lenho de tração; LO - Lenho Oposto. Tons mais escuros representam os maiores valores dentro de cada intervalo. Fonte: Do autor (2021).

Os resultados das análises de variância para AMF estão resumidos na Tabela 5. Observa-se que apenas o efeito da posição radial do tronco foi significativo, diferentemente dos efeitos para altura da amostragem, tipo de tronco e interações.

Tabela 5 – Análise de variância do ângulo das microfibrilas da madeira de *Corymbia citriodora*.

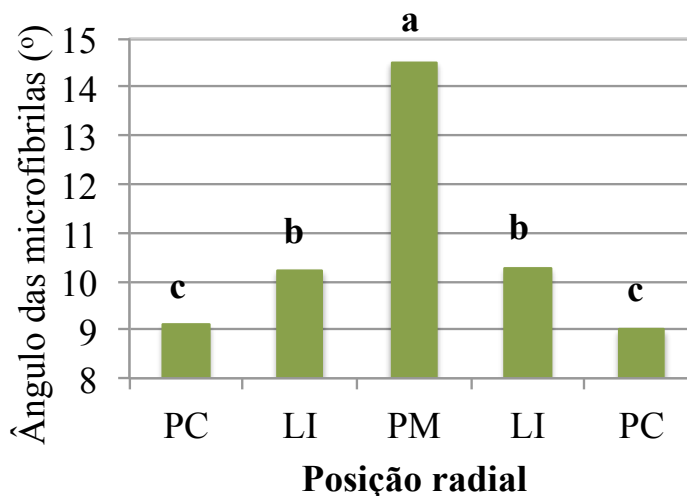
	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	Pr(>F)
Altura	2	2,09	2,909	0,0968 ^{ns}
Posição radial	4	48,25	67,286	2,99 ⁻⁸ *
Tipo de tronco	1	0,01	0,010	0,9234 ^{ns}
Posição radial x tipo de tronco	4	0,20	0,277	0,8869 ^{ns}
Resíduos	11	0,72		

*' 0,01; ^{ns} (não significativo).

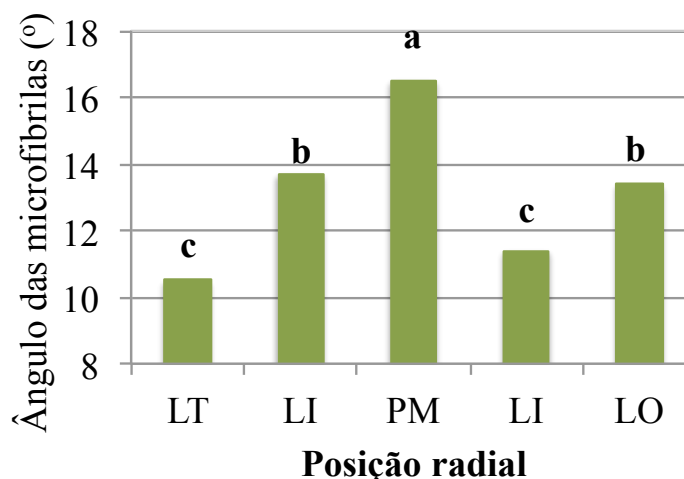
Os valores médios do conjunto total de dados e teste de Scott-Knott para AMF (Figura 16) estão representados de acordo com a posição radial: próximo à casca, lenho intermediário e próximo à medula, para árvores de tronco ereto (E1, E2, E3); e lenho de tração/oposto, lenho intermediário e próximo à medula, para árvores de tronco inclinado (I1, I2, I3).

Figura 16 – Valores médios do ângulo das microfibrilas para as árvores de tronco ereto (E1, E2, E3) e de tronco inclinado (I1, I2, I3) de *Corymbia citriodora*.

Árvores de tronco ereto (E1, E2, E3)



Árvores de tronco inclinado (I1, I2, I3)



Legenda: PC - Próximo à casca; LI - Lenho intermediário; PM - Próximo à medula; LT - Lenho de tração; LO - Lenho Oposto. Letras iguais não se diferem estatisticamente pelo teste Scott-Knott (5%). Fonte: Do autor (2021).

Considerando o conjunto dos dados analisados, uma vez que houve diferença estatística apenas entre as posições radiais (Tabela 5), nota-se que para as árvores de tronco ereto, o AMF tende a ser maior na região próxima à medula ($14,5^\circ$); em seguida ele vai decrescendo na região do lenho intermediário (em torno de $10,2^\circ$) até seu menor valor de aproximadamente 9° para as regiões próximas à casca. Já para árvores de tronco inclinado, os maiores valores de AMF foram encontrados na região próxima à medula ($16,5^\circ$), no lenho intermediário próxima ao lenho de tração ($13,8^\circ$) e na região do lenho oposto ($13,4^\circ$), sendo esses valores considerados

estatisticamente iguais; os menores AMFs, foram encontrados na região do lenho de tração ($10,5^\circ$) e no lenho intermediário próxima ao lenho oposto ($11,4^\circ$). Essa diferença entre os valores médios de AMF do lenho oposto e lenho de tração é um dos fatores que contribuem para garantir a estabilidade mecânica, como forma de garantir um equilíbrio entre forças de tração e compressão, que agem no tronco para reorientá-lo à posição vertical.

Os valores médios de AMF encontrados para *C. citriodora* para ambos os lenhos (Figura 16) encontram-se no intervalo observado por Souza et al. (2017) para madeira de *Corymbia*, e ainda apresentam comportamento semelhante de diminuição do AMF no sentido medula-casca para as árvores de tronco ereto. Menores valores de AMF ($< 10^\circ$) são associados a maiores valores de rigidez e resistência do lenho de tração (DONALDSON, 2008), pois eles são quase paralelos ao eixo longitudinal das fibras.

Considerando-se que apenas a posição radial diferiu estatisticamente para essa propriedade analisada, podemos inferir que biologicamente essa variação no sentido medula-casca auxilia na biomecânica da árvore para mantê-la em pé. As regiões com maiores AMFs proporcionam maior flexibilidade na percepção dos fatores externos nos estágios iniciais de desenvolvimento da árvore, ou seja, no lenho juvenil, próximos à medula; e regiões como o lenho de tração, com menor AMF, garantem rigidez e força necessárias para manutenção do tronco na posição vertical. Além disso, outras regiões com menores AMFs, ou seja, aquelas compreendidas no lenho intermediário e alburno do lenho normal, contribuem na manutenção do equilíbrio dinâmico das tensões de crescimento das árvores para se manterem em pé.

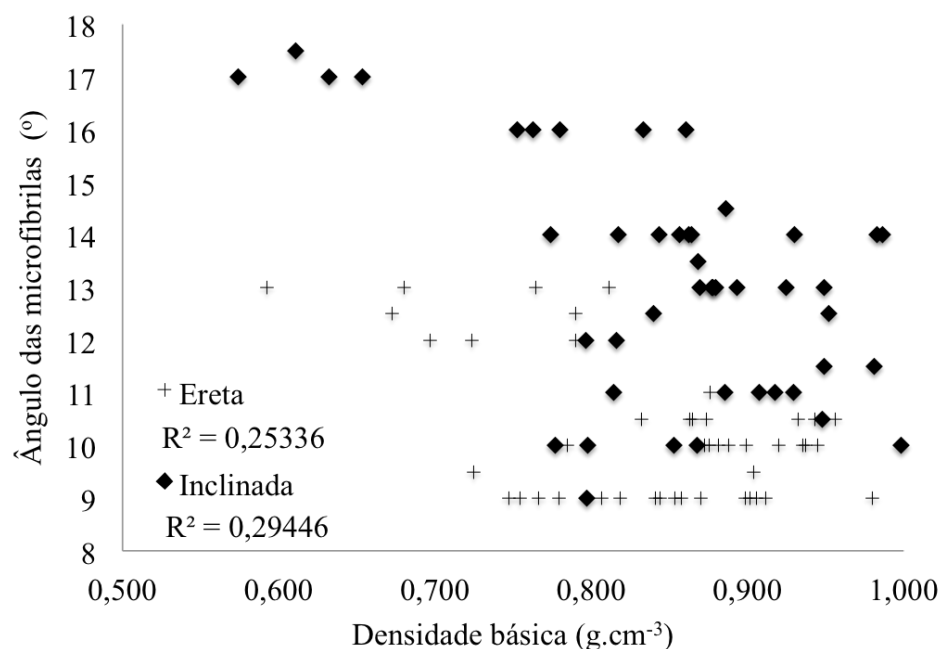
É importante salientar que a formação da madeira em uma determinada fase do crescimento obedece a fatores ambientais existentes para aquele tempo. Fatores como competição por luz e nutrientes, ventos e outros, possivelmente exercem influências diferentes, dependendo da idade e dimensões das árvores. Por exemplo, o vento que pode flexionar uma árvore mais jovem, induzindo a formação de lenho de reação, provavelmente não exerce o mesmo efeito quando essa árvore for mais velha e, conseqüentemente, tiver tronco mais grosso.

4.7 Correlação entre densidade básica e AMF

A relação entre a densidade básica e o AMF, foi calculada pela correlação de Pearson, separadamente, para cada tipo de tronco (Figura 17). O resultado da correlação foi negativo para

ambos os tipos, sendo -0,50 para as árvores troncos eretos (E1, E2, E3) e -0,54 para as árvores de troncos inclinados (I1, I2, I3), significativos ao nível de 1% de probabilidade de erro.

Figura 17 - Correlação entre o ângulo das microfibrilas e densidade básica nas respectivas alturas e posições radiais amostradas dos troncos eretos (E1, E2, E3) e inclinados (I1, I2, I3) de *Corymbia citriodora*.



Legenda: R^2 – coeficiente de determinação. Fonte: Do autor (2021).

Essa correlação negativa é considerada fraca (DANCEY; REIDY, 2006), demonstrando que o ângulo das microfibrilas varia de forma inversa à densidade básica. Na Figura 17 nota-se que o aumento na densidade básica está relacionado com a redução do AMF em apenas 25% a 29% dos casos, de acordo com os coeficientes de determinação, justificado pela variação nos tipos de lenho das posições radiais analisadas.

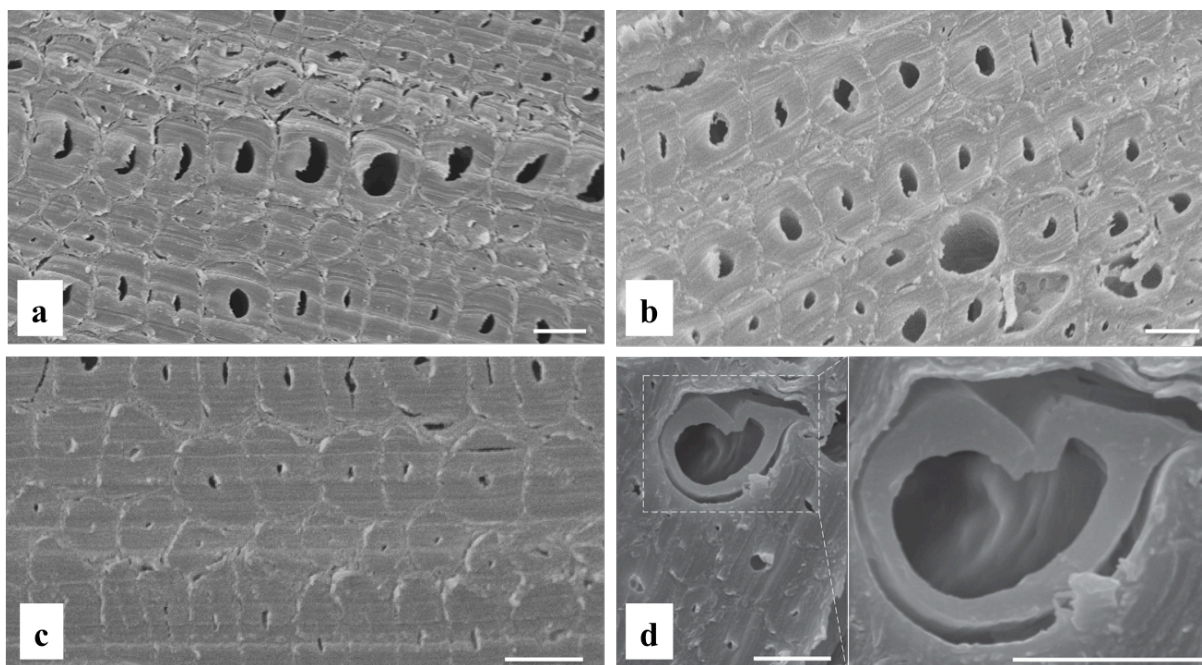
Há uma precaução que deve ser tomada na análise do resultado dessa correlação, pois para a análise do AMF é considerada apenas a média de medição para 20 fibras individualizadas, enquanto para a densidade, embora o tamanho da amostra seja diminuto, o resultado representa o valor médio de um conjunto maior de fibras e outras células do lenho. Além disso, levando-se em conta que o AMF tem a tendência de diminuição no sentido medula-casca, associado ao fato de que a densidade básica tende a aumentar nesse mesmo sentido, pode-se dizer que essa correlação encontrada foi casual, pois não há indícios que comprovam tal tendência entre árvores quando comparamos valores médios de densidade básica e AMF para a árvore toda (Figuras 14 e 16),

corroborando com o trabalho de Evans, Stringer e Kibblewhite (2000). Os autores, apesar de encontrarem correlação inversa entre essas duas propriedades em *E. nitens* considerando apenas pequeno número de anéis de crescimento consecutivos, ressaltaram que essa tendência não se manteve entre as árvores analisadas considerando as médias dos valores de AMF e densidade para a árvore inteira.

4.8 Caracterização da parede celular no microscópio eletrônico de varredura (MEV)

Por meio da caracterização da parede celular das fibras no microscópio eletrônico de varredura foi possível constatar diferenças na parede celular das fibras para diferentes regiões amostradas (Figura 18). Considerando as três regiões amostradas, pode-se notar que no lenho normal (Figura 18a) as fibras com camada S2 da parede celular secundária e seus lumes apresentam-se com formato mais arredondado. Um padrão semelhante de fibras do lenho normal também foi encontrado no lenho oposto (Figura 18b), no qual as fibras também aparentam formatos arredondados.

Figura 18 – Imagens obtidas na microscopia eletrônica de varredura (MEV) no plano transversal das amostras de lenhos normal, oposto e de tração de *Corymbia citriodora*.



Legenda: **a** Lenho normal (aumento 1700x); **b** Lenho de oposto (aumento 1700x); **c** Lenho de tração (aumento 1700x); **d** Lenho de tração (aumento 4180x) (área pontilhada detalhando a presença da camada gelatinosa na fibra - aumento 10000x). Barras: 10 μ m. Fonte: Do autor (2021).

Em algumas regiões do lenho de tração as fibras se apresentaram em um formato mais achatado ou retangular comparado ao lenho normal e oposto (Figura 18c), lumes bem reduzidos e sem presença da camada gelatinosa destacada da parede celular secundária. Entretanto, para outras regiões do lenho de tração, observou-se a presença de camada gelatinosa em algumas fibras (Figura 18c), sendo notável o aspecto destacado da parede secundária. Essa característica é típica dessa camada e pode ser influenciada pela metodologia aplicada no preparo das amostras para o MEV. Supostamente, cortes mais finos tendem a gerar o destacamento da camada gelatinosa, pelo baixo ângulo das microfibrilas, praticamente paralelo ao eixo das fibras (CLAIR, THIBAUT E SUGIYAMA, 2005).

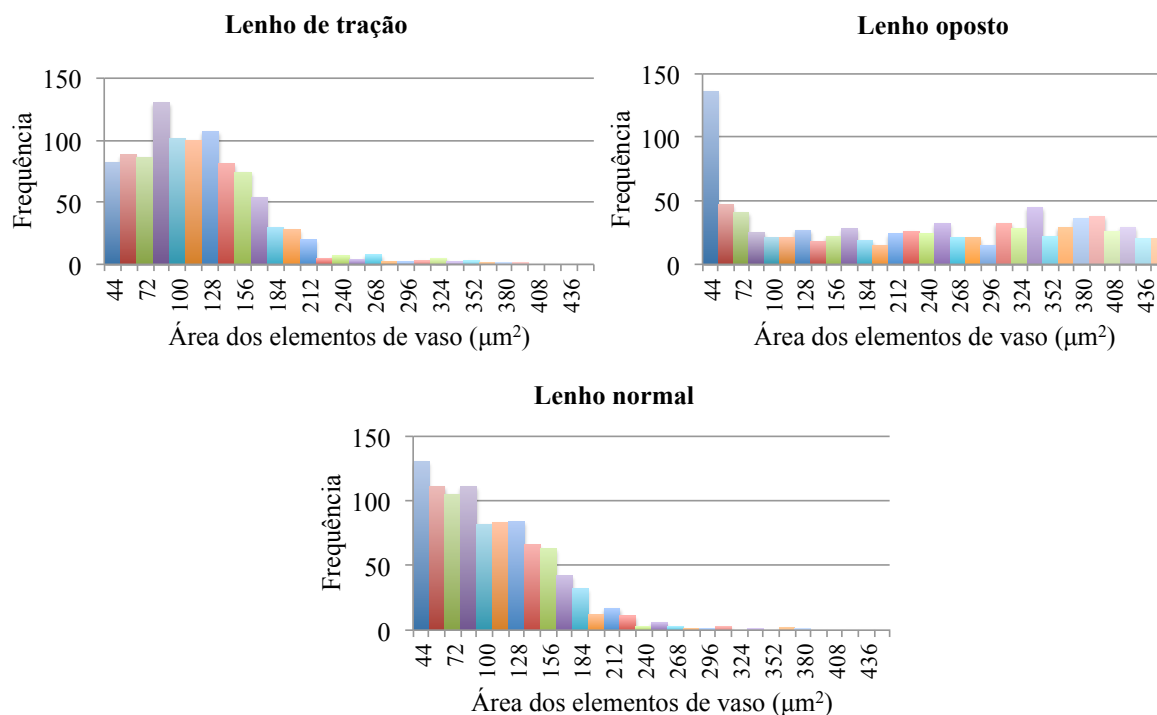
A presença da camada gelatinosa é uma evidência que comprova a presença de lenho de tração (WARDROP, 1964; GIERLINGER; SCHWANNINGER, 2006). Porém, foram poucas regiões encontradas com a presença notável de fibras com essa camada na amostra analisada, apesar de ter sido encontrado um baixo ângulo microfibrilar nessas regiões, típico de lenho de tração (Figura 16). Essa constatação corrobora uma das premissas iniciais que, dependendo da espécie, o lenho de tração pode não apresentar camada gelatinosa (WILSON; ARCHER, 1977), ou ainda, apresentar poucas regiões contendo-a, mesmo estando em condições ideais de sua formação (QIU et al., 2008). Talvez seja por essa limitação que não encontramos estudos que até o momento comprovem a existência da camada gelatinosa para a espécie *Corymbia citriodora*.

4.9 Micro-CT - Análise de imagens bidimensionais

A partir da análise das imagens bidimensionais geradas no Micro-CT, as quais representaram o plano transversal de cada amostra, foi possível verificar a frequência média dos elementos de vasos de acordo com a área ocupada, com base nos histogramas representados pela Figura 19.

Com a verificação da área dos elementos de vasos permite-se inferir a respeito do maior ou menor investimento em condução de seiva em relação ao tipo de lenho analisado. Para se permitir uma comparação entre os três tipos de lenho, foram definidos intervalos crescentes de $14 \mu\text{m}^2$ para cada classe, iniciando em $30 \mu\text{m}^2$ e finalizando em $450 \mu\text{m}^2$, menor e maior valores identificados, respectivamente.

Figura 19 – Frequência média das áreas dos elementos de vasos (μm^2) para o lenho de tração, oposto e lenho normal de *Corymbia citriodora*.



Fonte: Do autor (2021).

Considerando-se o lenho de tração, os elementos de vasos apresentaram suas áreas com distribuição média similar a de uma curva normal, tendo seu pico de frequência (130) registrado pela área compreendida entre 72 e 86 μm^2 . A média geral observada foi uma área de 103 μm^2 .

Para o lenho normal houve uma distribuição típica de curva exponencial decrescente, em que a maior frequência observada foi de aproximadamente 130 elementos de vasos com áreas compreendidas entre 30 e 44 μm^2 , com sucessivo decréscimo de frequência com o incremento da área (inversamente proporcional), apresentando média geral de área de 89 μm^2 .

No lenho oposto, observou-se um pico de frequência próximo a 140 elementos de vasos com áreas também compreendidas entre 30 e 44 μm^2 , assim como observado no lenho normal, porém para os incrementos de áreas sucessivos, houve uma flutuação nas frequências sempre observadas abaixo de 50. A média geral da área dos elementos de vasos foi de aproximadamente 238 μm^2 .

Tendo-se em vista os valores apresentados, o lenho de tração tende a apresentar em média área de elementos de vasos inferior ao lenho oposto. Porém sua frequência é praticamente

triplicada como forma de compensar as possíveis perdas em área responsável pela condutividade de seiva.

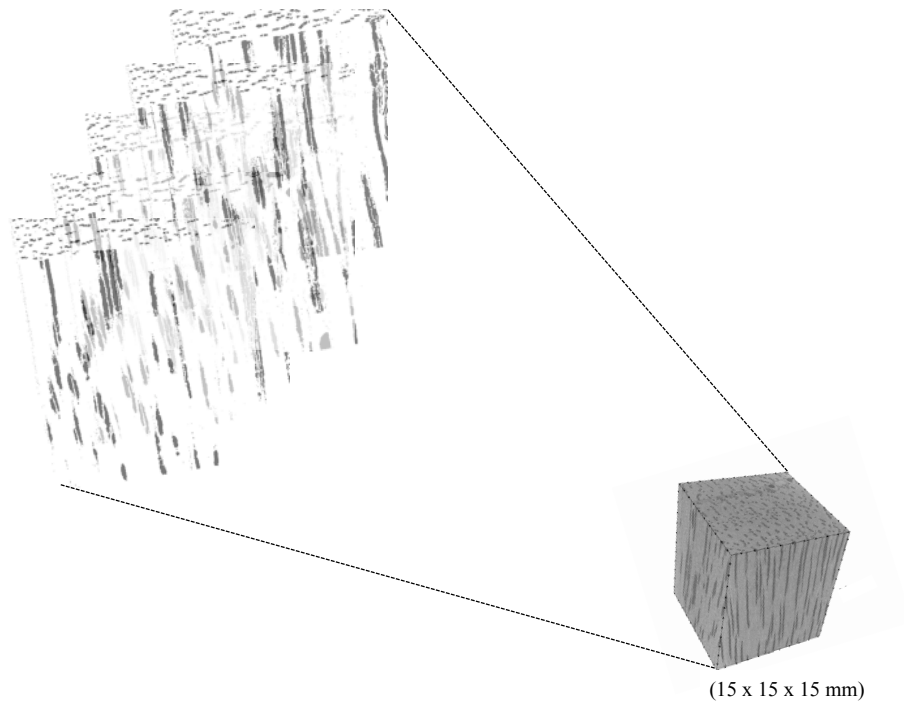
Os resultados encontrados para o lenho de tração neste trabalho divergem parcialmente daqueles encontrados por Jourez, Riboux e Leclercq (2001a), Ruelle et al. (2006) e Brereton et al. (2015), que observaram diminuição na frequência de elementos de vasos. Entretanto, apesar do resultado desse estudo evidenciar aumento na frequência total dos elementos de vasos no lenho de tração comparado ao lenho oposto, houve redução de aproximadamente 40% dessa área total disponível à condutividade no lenho de tração quando comparado ao lenho oposto, devido ao investimento em menores diâmetros (áreas úteis) dos elementos de vasos.

Essa estratégia utilizada pelo lenho de tração assegura um maior investimento em sustentação, que seria sua função primordial na manutenção do tronco inclinado, mas garante também a condutividade, em menor proporção, a qual é compensada pelo lenho oposto.

4.10 Micro-CT - Análise de imagens tridimensionais

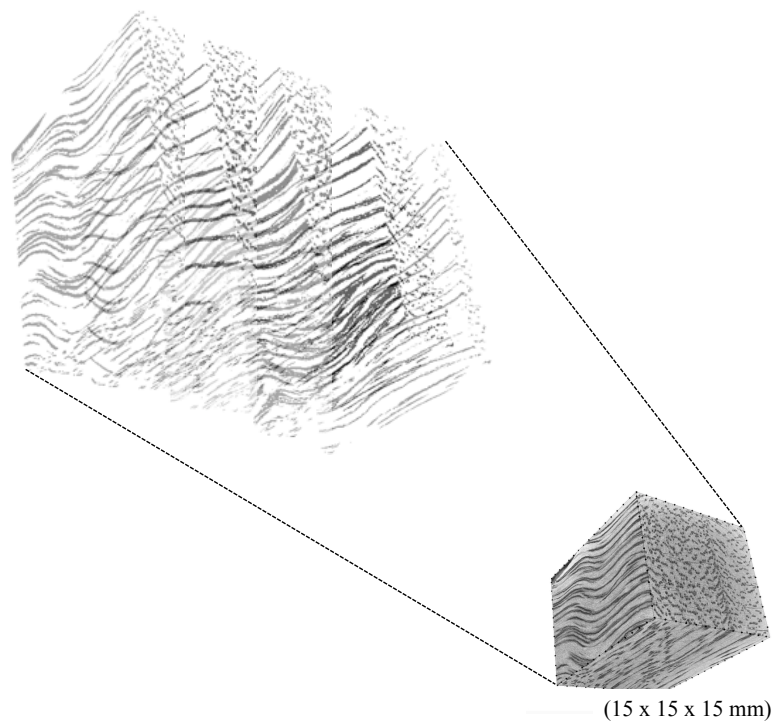
A análise tridimensional das amostras possibilitou evidenciar a disposição da arquitetura dos elementos de vasos. Com a sobreposição de imagens em sequência no plano tangencial, foi possível observar o comportamento dos elementos de vasos no sentido longitudinal e até mesmo se ocorre alguma alteração entre anéis de crescimento. Os exemplos de como ocorreram as mudanças estão representados nas Figuras 20, 21 e 22.

Figura 20 – Micro-CT (imagem tridimensional) de uma amostra evidenciando a mudança na arquitetura inclinada dos elementos de vasos em cortes segmentados do plano tangencial.



Fonte: Do autor (2021).

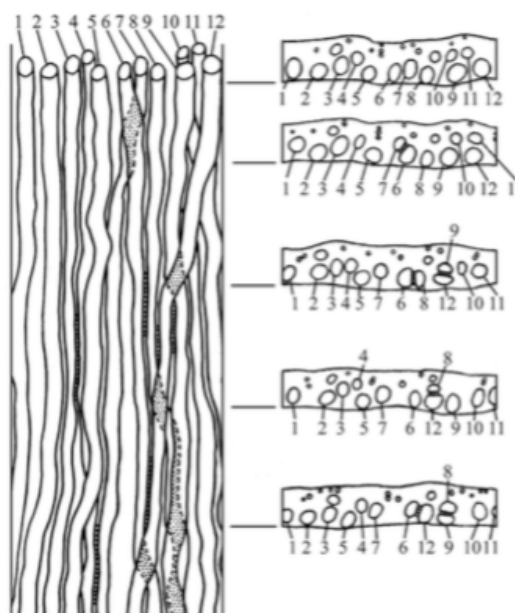
Figura 21 – Micro-CT (imagem tridimensional) de uma amostra evidenciando a mudança na arquitetura sinuosa dos elementos de vasos em cortes segmentados do plano tangencial.



Fonte: Do Autor (2021).

Nota-se na primeira amostra (Figura 20) que os elementos de vasos estão dispostos com leve inclinação e apresentam-se descontínuos, ou seja, permeiam diferentes camadas considerando as sobreposições de imagens no plano tangencial. Porém, ao observarmos o segundo corpo de prova (Figura 21), os elementos de vasos são sinuosos e dispostos continuamente no mesmo segmento tangencial. Além disso, essa sinuosidade é aleatória entre as camadas que formam os anéis de crescimento. Há ainda um terceiro exemplo de sinuosidade do elemento de vaso encontrado em formato espiral, semelhante ao relatado por Kedrov (2012) (Figura 22).

Figura 22 – Disposição dos elementos de vasos com sinuosidade em formato de espiral. Na direita, é possível observar pequenas mudanças no posicionamento dos elementos de vasos, bem como algumas diferenças em seu diâmetro, considerando o sentido transversal de acordo com a altura amostrada.



Fonte: Kedrov (2012).

Segundo Kedrov (2012), essa sinuosidade dos elementos de vasos é geralmente observada no plano tangencial, mas a sinuosidade no plano radial também pode ocorrer (Figura 22), conferindo o formato em espiral. Ainda de acordo com o autor, esses tipos de elementos de vasos são unidos em sistema contínuo tridimensional e comunicam-se lateralmente entre si; a condução de água nesses elementos de vasos ocorre então nos três sentidos: longitudinal, radial e tangencial.

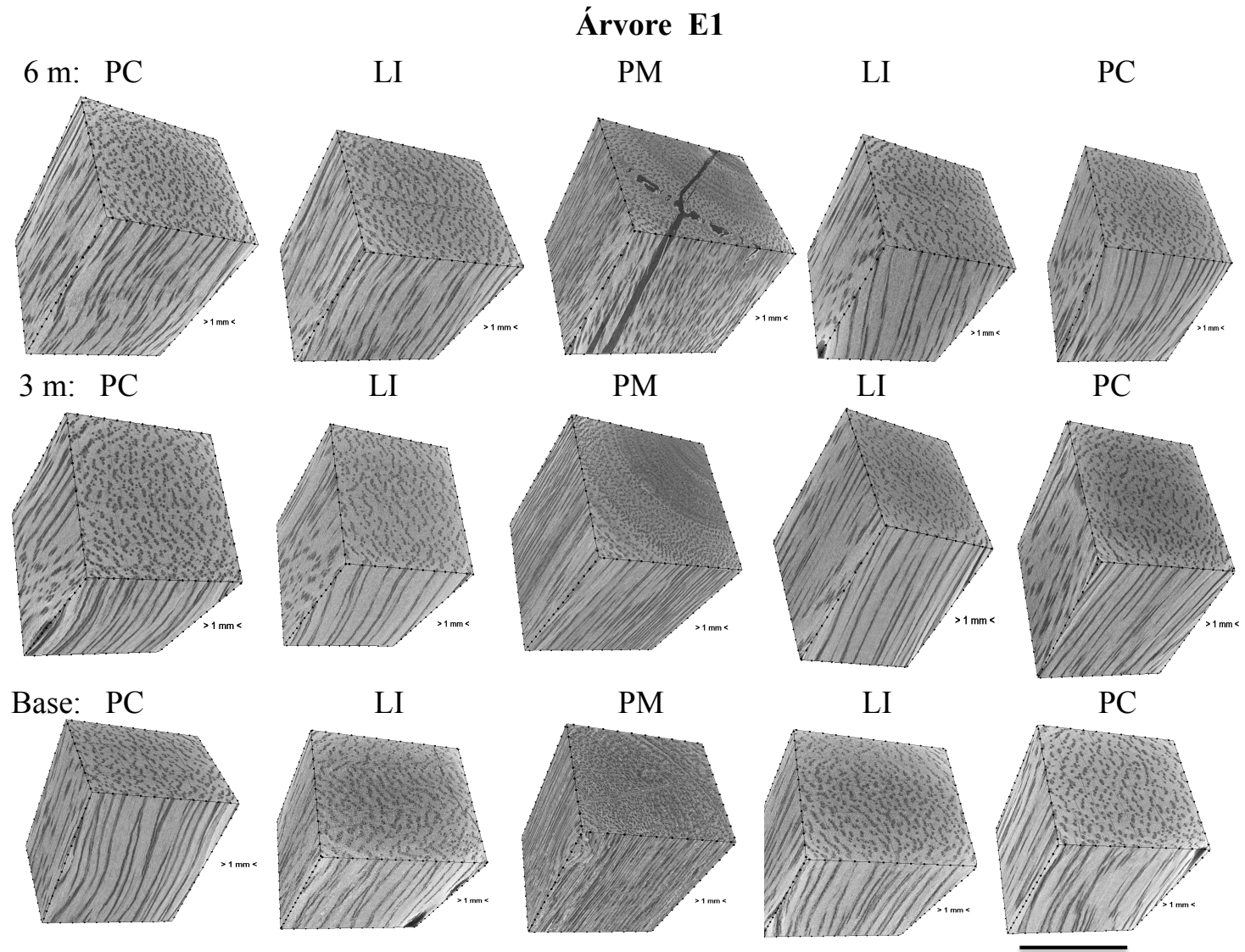
Considerando as leis de mecânica dos fluidos, Akachuku (1987) afirmou que perdas nas velocidades de condução de fluidos podem ocorrer com maior frequência em elementos de vasos sinuosos ou espiralados do que no elemento de vaso mais retilíneo, sendo, portanto, menos eficientes nesse quesito. Apesar dessa disposição dos elementos de vasos variarem em tamanho e forma, seu conjunto compensa essas perdas, funcionando como sistema único e eficiente de condução retilínea.

Para se conhecer melhor o perfil de distribuição da arquitetura dos elementos de vasos, as imagens tridimensionais de Micro-CT foram posicionadas nas respectivas alturas e posições radiais amostradas (Figuras 23 – 28). Nota-se que as madeiras das árvores de tronco ereto (Figuras 23 – 25) apresentam em geral a tendência de elementos de vasos dispostos em formato suave espiralado ou levemente inclinados, principalmente nas regiões próximas à casca (PC) e nos lenhos intermediários (LI). Essas conformações menos sinuosas, mais próximos do formato retilíneo, garantem melhor eficiência no fluxo de água das regiões mais baixas para as regiões mais altas das árvores, indo ao encontro do que foi afirmado por Akachuku (1987)

Para as árvores de tronco inclinado (Figuras 26 – 28), a tendência geral apresentada pelos elementos de vasos são formatos mais espirados ou levemente sinuosos nos sentidos longitudinal e transversal. Porém, para a árvore I3 (Figura 28), a qual apresentou maior inclinação do tronco em relação as demais, observa-se que nas amostras do lenho oposto (Figura 21), principalmente na base, os elementos de vasos foram mais sinuosos, comparados aos do lenho de tração, que se dispuseram mais inclinados.

Esses resultados podem ser explicados pela variação ocorrida durante a formação dos elementos estruturais na divisão do câmbio vascular, o qual está relacionado diretamente com a disposição da grã (LARSON, 1994). Essa sinuosidade alternada é típica da grã intercruzada (HEJNOWICZ, ROMBERGER, 1979). De acordo com Akachuku (1987), a grã retilínea seria mais eficiente na distribuição de seiva bruta, sendo, aparentemente, a grã entrecruzada menos eficiente. Porém, com o incremento radial mais lento no lenho adulto, a grã intercruzada surge como uma estratégia para melhorar a distribuição da seiva das raízes para a copa (KUBLER, 1991), pois os elementos de vasos ao tornarem-se mais sinuosos, seguindo a formação da grã, aumentam sua superfície específica comparado a um formato retilíneo. O autor acrescenta que além do lenho adulto, troncos excêntricos tendem a formar grã intercruzada para melhorar esse fornecimento de seiva, o que foi observado em nossos resultados.

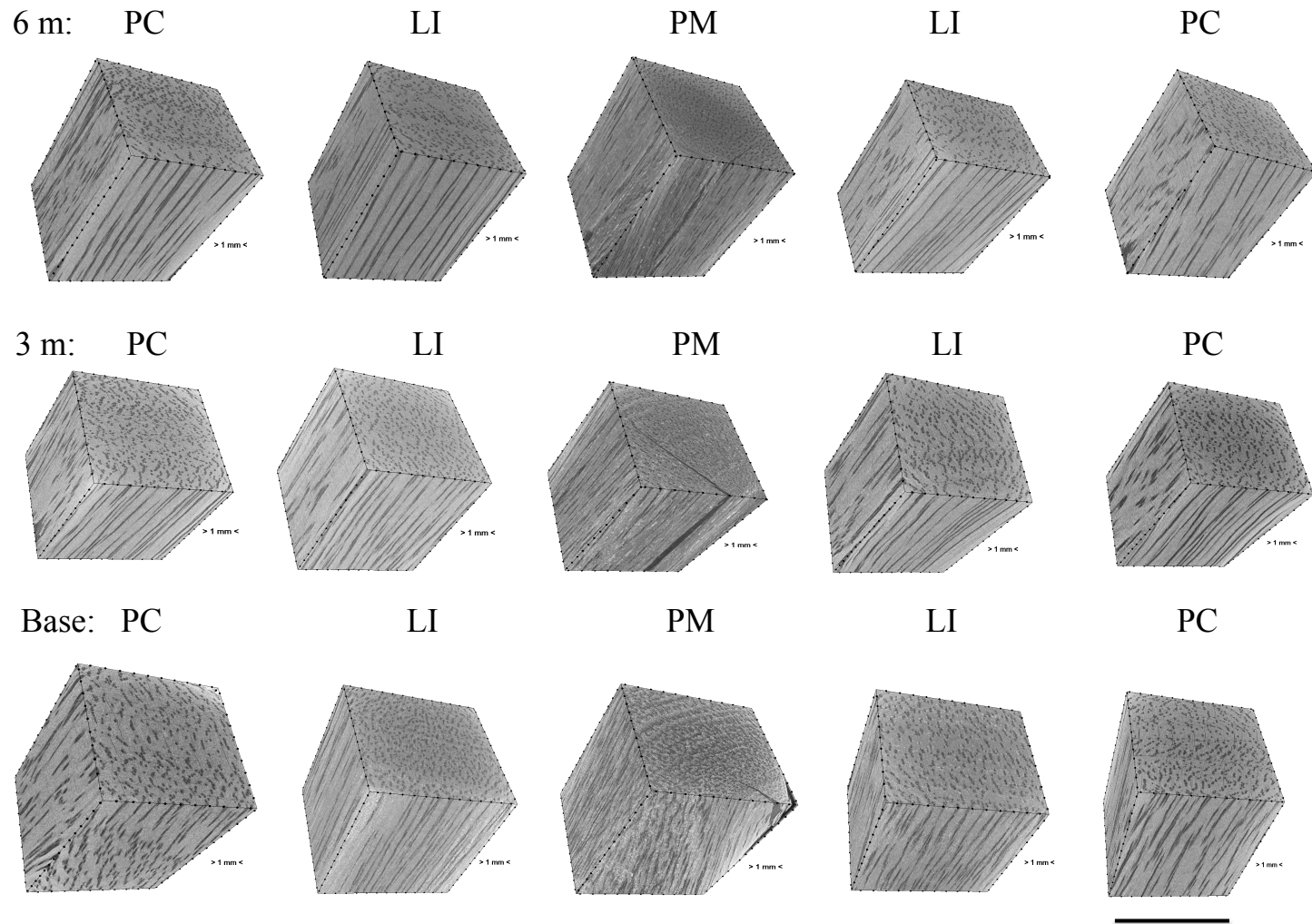
Figura 23 – Imagens tridimensionais das amostras de madeiras (Micro-CT) da árvore de tronco ereto E1 de *Corymbia citriodora*.



Legenda: PC - Próximo à casca; LI - Lenho intermediário; PM - Próximo à medula. Barra: 10 mm. Fonte: Do autor (2021).

Figura 24 – Imagens tridimensionais das amostras de madeiras (Micro-CT) da árvore de tronco ereto E2 de *Corymbia citriodora*.

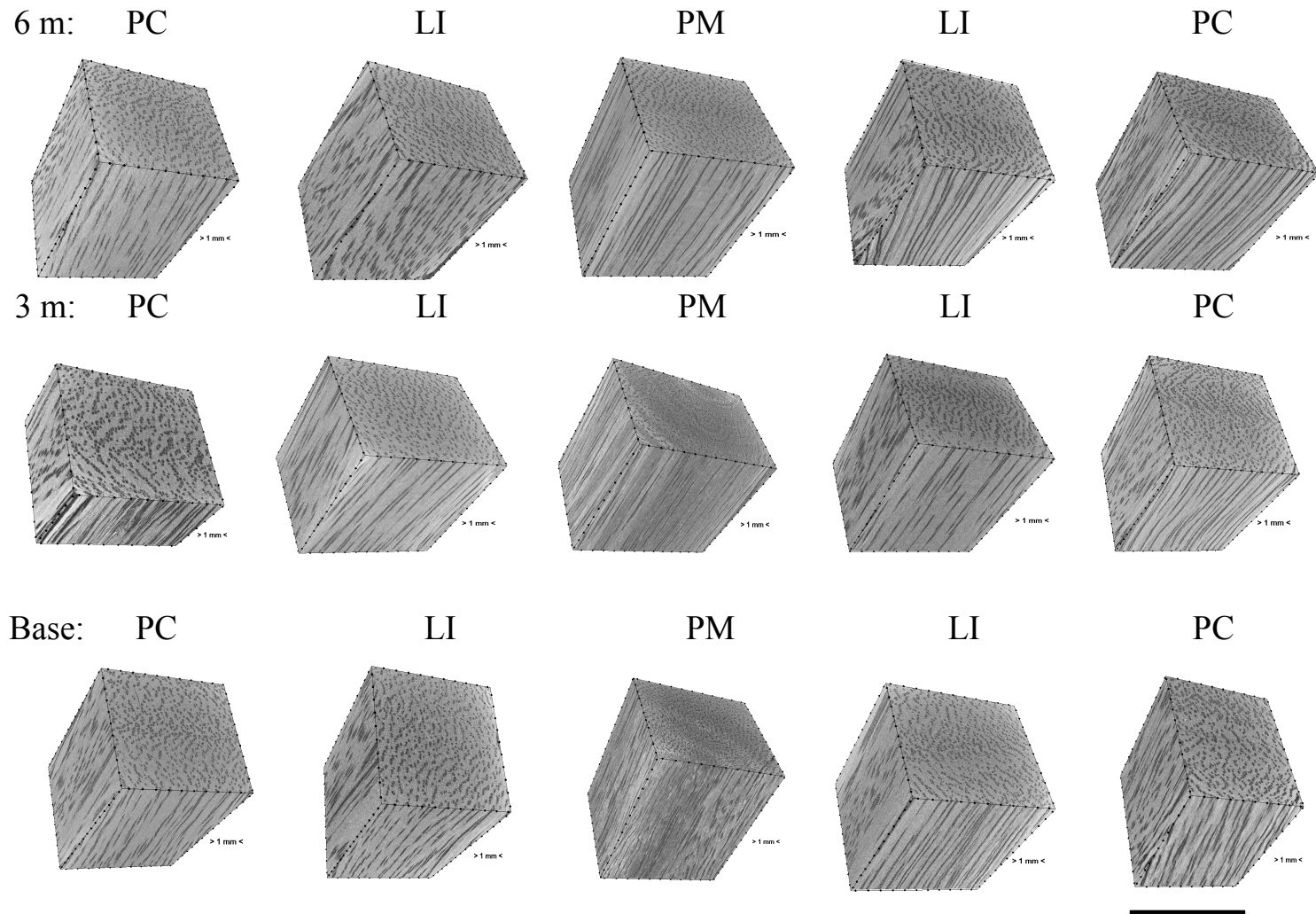
Árvore E2



Legenda: PC - Próximo à casca; LI - Lenho intermediário; PM - Próximo à medula. Barra: 10 mm Fonte: Do autor (2021).

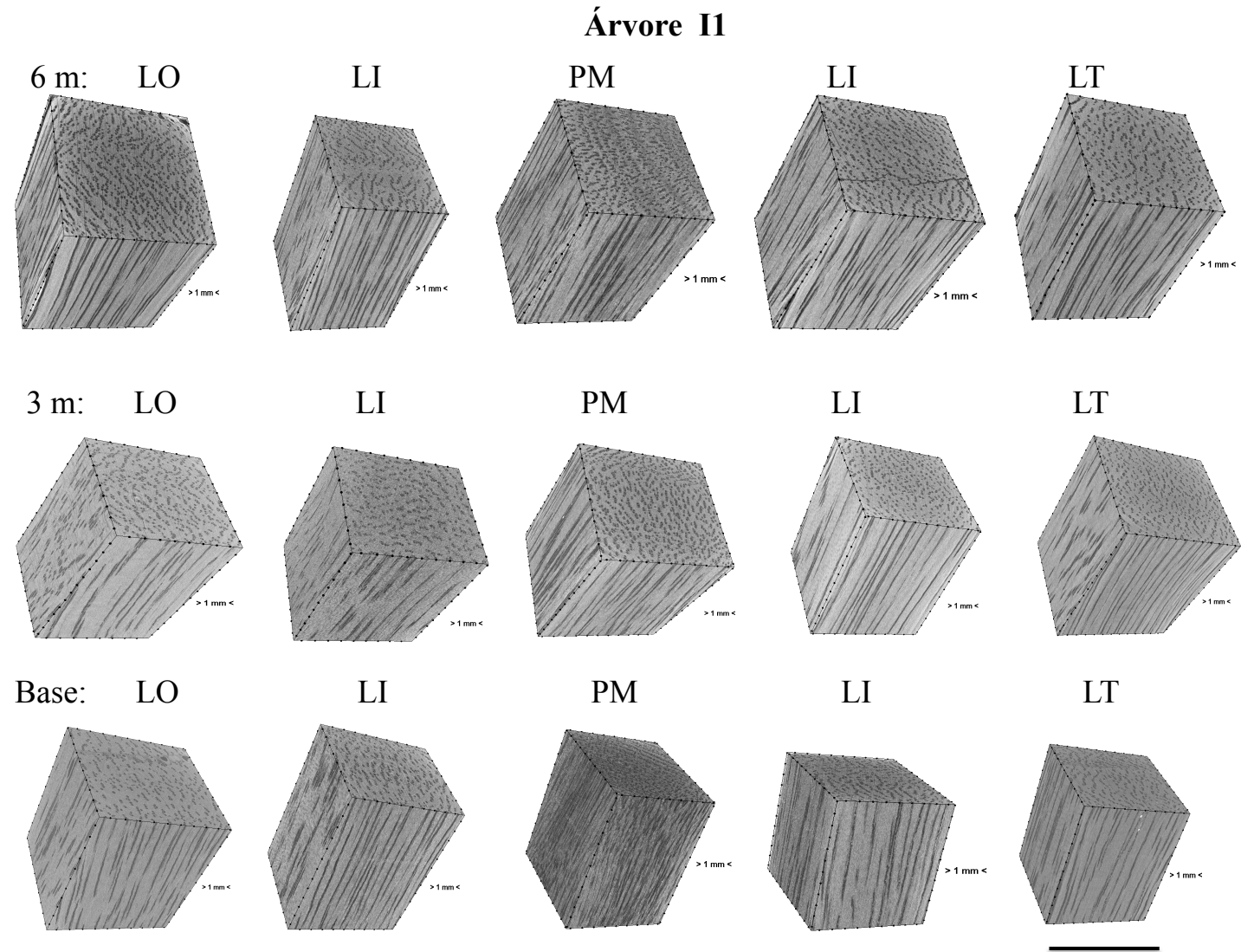
Figura 25 – Imagens tridimensionais das amostras de madeiras (Micro-CT) da árvore de tronco ereto E3 de *Corymbia citriodora*.

Árvore E3



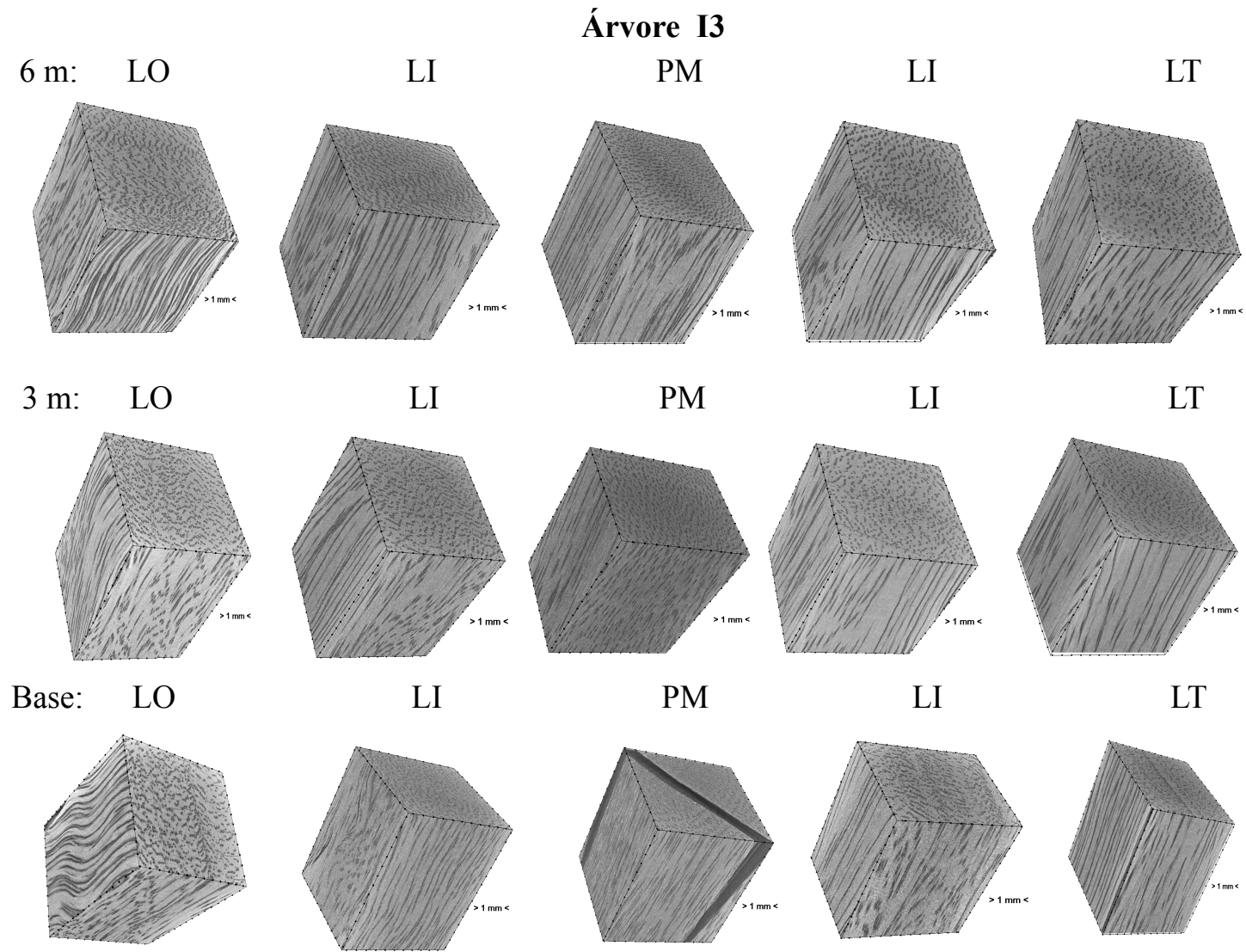
Legenda: PC - Próximo à casca; LI - Lenho intermediário; PM - Próximo à medula. Barra: 10 mm. Fonte: Do autor (2021).

Figura 26 - Imagens tridimensionais das amostras de madeiras (Micro-CT) da árvore de tronco inclinado I1 de *Corymbia citriodora*.



Legenda: LI - Lenho intermediário; PM - Próximo à medula; LT - Lenho de tração; LO - Lenho Oposto. Barra: 10 mm. Fonte: Do autor (2021).

Figura 28 – Imagens tridimensionais das amostras de madeiras (Micro-CT) da árvore de tronco inclinado I3 de *Corymbia citriodora*.



Legenda: LI - Lenho intermediário; PM - Próximo à medula; LT - Lenho de tração; LO - Lenho Oposto. Barra: 10 mm. Fonte: Do autor (2021).

5. CONCLUSÕES

Houve diferença no padrão de distribuição periférica das deformações residuais longitudinais para árvores de tronco ereto e inclinado de *Corymbia citriodora*. A distribuição tende a ser mais homogênea para árvores de troncos eretos. Contrariamente, mais heterogênea e com maior magnitude no lado tracionado das árvores de troncos inclinados. Os resultados das deformações residuais longitudinais indicaram a possível presença de lenho de tração nas árvores de tronco inclinados e até mesmo uma porção comprimida em um tronco de árvore ereta, que aparentemente não apresentava evidências de lenho de tração.

Considerando os formatos do tronco em diferentes alturas de amostragem, a presença de espessamento basal foi o fator essencial na definição do índice de não circularidade porque também podem indicar possíveis desvios de medula, mesmo para árvores eretas. Embora as excentricidades da medula apenas tenham diferido estatisticamente entre os tipos de troncos eretos e inclinados, pode-se inferir que as mudanças de orientação de desvio da medula variaram independentemente do tipo de tronco. Enquanto as árvores eretas mostraram leve padrão de mudança na orientação do desvio da medula, as árvores inclinadas tenderam a apresentar maior desvio da medula e mudar os padrões de sua orientação em relação à altura, o que provavelmente é induzido pelo formato do caule na base. Os resultados obtidos demonstraram a importância do formato do tronco no controle postural para a biomecânica de lenhos de tração.

Em relação à densidade básica, apenas houve diferença significativa entre as regiões radiais analisadas, sendo em geral mais densas próximas ao alburno e menos densas próximas ao lenho juvenil, independentemente de serem relativas a troncos eretos ou inclinados. Essa variação da densidade dentro do tronco tendeu a ser maior do que entre os troncos das árvores da mesma espécie.

O ângulo das microfibrilas apresentou amplitude média de 8,5° entre as regiões analisadas, com seu menor valor no lenho de tração. Considerando os perfis de distribuição de densidade básica e ângulo das microfibrilas, as árvores de tronco ereto tenderam a apresentar um padrão mais homogêneo quando comparadas às árvores de tronco inclinado, que variam consideravelmente, principalmente no lenho de tração na sua região intermediária.

Foi possível detectar a presença de camada gelatinosa nas fibras do lenho de tração de *Corymbia citriodora* após a caracterização da parede celular pela microscopia eletrônica de varredura. Além disso, o formato das fibras no lenho oposto e lenho normal foi semelhante, sendo mais arredondado do que o formato das fibras do lenho de tração, que se apresentaram mais achatadas.

O lenho de tração apresentou, em média, uma área de elementos de vasos inferior ao lenho oposto, porém a frequência dos elementos de vasos foi maior como forma de compensar as possíveis perdas em área responsável pela condutividade de seiva. Essa estratégia utilizada pelo lenho de tração assegura um maior investimento em sustentação, que seria sua função primordial na manutenção do tronco inclinado, mas garante também a condutividade, em menor proporção, compensada pelo lenho oposto.

As alterações na arquitetura dos elementos de vasos pela análise dos resultados da micro-CT permitiram definir uma tendência de formatos suavemente sinuosos e inclinados para as árvores de tronco ereto, e formatos mais sinuosos e espiralados no lenho oposto e mais inclinados no lenho de tração. Essas alterações são consequência de alterações da grã inter cruzada de *Corymbia citriodora* e representam possivelmente uma adaptação à melhor distribuição do fluxo de água de acordo com a inclinação do tronco da árvore adulta.

A partir da caracterização macro e microestrutural dos troncos propensos à formação de lenho de reação, especialmente dos troncos inclinados, pode-se concluir que as diferenças entre os lenhos de *Corymbia citriodora* foram relevantes para se compreender melhor as estratégias e tendências utilizadas no desenvolvimento do lenho de tração.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUAYO, M. G.; MENDONÇA, R. T.; MARTÍNEZ, P.; RODRÍGUEZ, J.; PEREIRA, M. Chemical characteristics and Kraft pulping of tension wood from *Eucalyptus globulus* labill. **Revista Árvore**, Viçosa, 36(6), 1163-1172, 2012.

AKACHUKU, A. E. A Study of lumen diameter variation along the longitudinal axis of wood vessels in *Quercus rubra* using cinematography. **IAWA Bulletin** n.s., Beijing v, 8 (1): 41-45, 1987.

ALMÉRAS, T.; CLAIR, B. Critical review on the mechanisms of maturation stress generation in trees. **J. R. Soc. Interface.**, London, v. 13, p. 1-14, 2016.

ANGYALOSSY-ALFONSO, V. **Caracterização Anatômica do lenho e da casca das principais espécies de *Eucalyptus* L'Hérit. cultivadas no Brasil**. 1987. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

ARCHER, R.R. **Growth Stresses and Strains in Trees**. Springer-Verlag, 1987, 240p.

BABA, K.; ONA, T.; TAKABE, K.; ITOH, T.; ITO, K. Chemical and Anatomical characterization of the tension wood of *Eucalyptus camaldulensis* L. **Mokuzai Gakkaishi**, Tokyo, 42 (8): 795-798, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT- **NBR 11941: Madeira: determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

BAILLÈRES, H.; FOURNIER-DJIMBI, M.; GÉRARD, J.; THIBAUT, B. **Growth stresses, end splitting and sawing distortions in *Eucalypts* from plantation**, in International Conference on Wood Mechanics (ed. S. Aicher), FMFA-Otto-Graf-Institut, Stuttgart, pp. 483–494, 1996.

BAILLÈRES, H. et al. Structure, composition chimique et retraits de maturation du bois chez les clones d'*Eucalyptus*. **Annals Science Forest**, Champenoux, v. 52, p. 157-172, 1995.

BAMBER, R. K. A general theory for the origin of growth stresses in reaction wood: How trees stay upright. **IAWA J.**, Beijing, 22: 205–212, 2001.

BARNETT, J. R.; CHAFFEY, N. J.; BARLOW, P. W. **Cortical microtubules and microfibril angle**. In: Microfibril Angle in Wood. Proceedings of the IAWA/IUFRO Int. Workshop on the Significance of Microfibril Angle to Wood Quality. Ed. B.G. Butterfield. IAWA/IUFRO. pp. 253–271, 1998.

BARNETT, J.; JERONIMIDIS, G. **Wood quality and its biological basis**. Blackwell: London, UK, 2003, 226 p.

BARNETT, J. R.; BONHAM, V. A. Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres. **Biol. Rev.**, Cambridge, 79: 461–472, 2004.

BAROTTO, A. J.; MONTEOLIVA, S.; GYENGE, J.; MARTINEZ-MEIER, A.; FERNANDEZ, M. E. Functional relationships between wood structure and vulnerability to xylem cavitation in races of *Eucalyptus globulus* differing in wood density. **Tree Physiology**, Edmonton, 38 (2) : 243–251, 2018.

BELTRAME, R.; PERES, M. L.; LAZAROTTO, M. et al. Growth stress and its relationship with end splits in logs of *Eucalyptus spp.* **Scientia Forestalis**, Piracicaba, 43: 63-74, 2015.

BOSCHETTI, W. T. N. **Qualidade da madeira de árvores de clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* inclinadas por ação de ventos para produção de celulose**, 2014. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo - 92 p. : il., 2014.

BOSCHETTI, W. T. N.; PAES, J. B.; VIDAURRE, G. B.; ARANTES, M. D. C.; SILVA, J. G. M. DA. Quality of reaction wood in *Eucalyptus* trees tilted by wind for pulp production. **CERNE**, Lavras, 23(3), 291-297, 2017.

BOSSU, J.; LEHNEBACH, R.; CORN, S.; REGAZZI, A.; BEAUCHÊNE, J.; CLAIR, B. Interlocked grain and density patterns in *Bagassa guianensis*: changes with ontogeny and mechanical consequences for trees. **Trees – Structure and Function**, Darmstadt, 32 (6): 1643-1655, 2018.

BOYD, J.D. Interpretation of X-Ray Diffractograms of Wood for assessments of Microfibril Angles in Fibre Cell. **Wood Science and technology**, München, 11(2): 93-114, 1977.

BOYD, J.D. Relationships between fibre morphology, growth strains and physical properties of wood. **Australian Forest Res.** Camberra, 10: 337–360, 1980.

BOYD, J.D. The key factor in growth stress generation in trees, lignification or crystallisation. **IAWA Bull.** n.s., Beijing, 6: 139–150, 1985a.

BOYD, J.D. **Biophysical Control of Microfibril Orientation in Plant Cell Walls: Aquatic and Terrestrial Plants Including Trees**. M. Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1985b, 200 pp.

BRERETON, N. J. B.; AHMED, F.; SYKES, D.; RAY, M. J.; SHIELD, I.; ANGELA KARP, A.; MURPHY, R. J. X-ray micro-computed tomography in willow reveals tissue patterning of reaction wood and delay in programmed cell death. **BMC Plant Biology**, Wageningen, 15:83, 2015, 1-11.

CARRODUS, S. J. Carbon dioxide and the formation of heartwood. **New Phytologist.**, Bristol, 70, p. 939-943, 1971.

CARVALHO, A. M.; GONÇALVES, M. P. M.; AMPARADO, K. F.; LATORRACA, J. V. F.; GARCIA, R. A. Correlações da altura e diâmetro com tensões de crescimento em árvores de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla*. **Revista Árvore**, Viçosa, 34:323-331, 2010.

CAVE, I. D. X-Ray Measurement of Microfibril Angle. **For. Prod. J.**, LaGrange, 44: 37 – 4, 1966.

CHAFFEY, N. Cambium: old challenges – new opportunities. **Trees**, Darmstadt, 13, 138–151, 1999.

CLAIR, B.; ALMÉRAS, T.; SUGIYAMA, J. Compression stress in opposite wood of angiosperms: observations in chestnut, mani and poplar. **Ann. For. Sci.**, Champenoux, 63, 507-510, 2006.

CLAIR, B.; ALMÉRAS, T.; YAMAMOTO, H.; OKUYAMA, T.; SUGIYAMA, J. Mechanical behavior of cellulose microfibrils in tension wood, in relation with maturation stress generation. **Biophysical Journal**, Rockville, 91: 1128–1135, 2006.

CLAIR, B.; RUELLE, J.; JACQUES BEAUCHÊNE, J.; PRÉVOST, M.; FOURNIER, M. Tension wood and opposite wood in 21 tropical rain forest species 1. Occurrence and efficiency of the G-layer **IAWA Journal**, Beijing, 27(3), 329–338, 2006.

CLAIR, B.; DÉJARDIN, A.; PILATE, G. ALMÉRAS, T. Is the G-Layer a Tertiary Cell Wall? **Front. Plant Sci.**, San Diego, 9: 623, 2018.

CLAIR, B.; THIBAUT, B.; SUGIYAMA, J. On the detachment of gelatinous layer in tension wood fiber. **Journal of Wood Science**, Kyoto, 51 (3), pp. 218-221, 2005.

CONSTANT, T. R.; MOTHE, F. D. R.; BADIA, M. A.; SAINT-ANDRE, L. How to relate the standing tree shape to internal wood characteristics: Proposal of an experimental method applied to poplar trees. **Annals of Forest Science**, Champenoux, 60: 371–378. 2003.

COTE, W. A.; DAY, A. C. **Anatomy and ultrastructure of reaction wood. In Cellular Ultrastructure of Woody Plants**, ed. W. A. Cote, pp. 391-418. Syracuse Univ. Press., 1965, 603 pp.

CUNHA, R. A.; GURGEL, J. T. A.; PISANI, J. F. Estudo comparativo entre *Eucalyptus citriodora* Hook, *Eucalyptus maculata* Hook e seus híbridos naturais. **IPEF**, Piracicaba, n. 18, p. 121-132, 1979.

DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia: usando SPSS para Windows**. Porto Alegre: Artmed, 2006.

DASSOT M.; FOURNIER, M.; NINGRE, F.; CONSTANT, T. Effect of tree size and competition on tension wood production over time in beech plantations and assessing relative gravitropic response with a biomechanical model. **American Journal of Botany**, Connecticut, 99:1427–1435, 2012.

DEBELL, J. D.; GARTNER, B. L. Stem Characteristics on the Lower Log of 35-Year-Old Western Redcedar Grown at Several Spacings. **Western Journal of Applied Forestry**, Washington, 12: 9–15, 1997.

DÉJARDIN, A.; LAURANS, F.; ARNAUD, D.; BRETON, C.; PILATE, G.; LEPLÉ, J-C. Wood formation in Angiosperms, **Comptes Rendus Biologies**, Mercenne, 333 (4), 325-334, 2010.

DIGBY, J.; FIRN, R. D. The gravitropic set-point angle (GSA): the identification of an important developmentally controlled variable governing plant architecture. **Plant, Cell and Environment**, Glasgow, 18:1434–1440, 1995.

DONALDSON, L. A. Lignification and lignin topochemistry – an ultrastructural view, **Phytochemistry**, Bari, 57: 859–873, 2001.

DONALDSON, L. Microbril angle: measurement, variation and Relationships – a review. **IAWA Journal**, Beijing, v. 29, n. 4, p. 345–386, 2008.

DU S., YAMAMOTO F. An overview of the biology of reaction wood formation. **J Integr Plant Biol.**, Beijing, 49:131–143, 2007.

ERIKSSON, M. E.; ISRAELSSON, M.; OLSSON, O.; MORITZ, T. Increased gibberellin biosynthesis in transgenic trees promotes growth, biomass production and xylem fiber length. **Nat Biotechnol**, 18:784–788, 2000.

EVANS, R.; STRINGER, S.; KIBBLEWHITE, R. P. Variation of microfibril angle, density and fibre orientation in twenty-nine Eucalyptus nitens trees. **Appita Journal**, Victoria, 53 : 450–457, 2000.

FAGERSTEDT, K.; TOCQUARD, K.; LOPEZ, D.; DECOURTEIX, M.; THIBAUT, B. et al. The molecular mechanisms of reaction wood induction. In: Barry Gardiner, John Barnett, Pekka Saranpää, Joseph Gril. **The biology of reaction wood**, Springer, pp.107-138, 2014.

FALLAH, A.; RIAHIFAR, N.; BARARI, K.; PARSAKHOO, A. Investigating the out-of-roundness and pith-off-centre in stems of three broadleaved species in Hyrcanian forests. **Journal of Forest Science**, Kangwon, 58:513–518, 2012.

FARUYA, N; TAKAHASHI, S.; MIAZAKI, H. The chemical composition of the gelatinous layer from the tension wood of *Populus euroamericana*. **J. Jpn Wood Res Soc.**, Tokyo, 20: 26-30, 1970.

FELTEN, J.; SUNDBERG, B. Biology, chemistry and structure of tension wood. In: Fromm J (ed) **Cellular aspects of wood formation, plant cell monographs**. Springer, Heidelberg, pp 203–224, 2013.

FERREIRA, S.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; MONTEIRO, T. C. Pith eccentricity in *Eucalyptus* clone stems cultivated on different topographies. **Cerne**, Lavras 14:335-340, 2008.

FISHER, J. B.; STEVENSON, J. W. Occurrence of reaction wood in branches of dicotyledons and its role in tree architecture. **Bot. Gaz.**, Chicago, 142 (2): 82-95, 1981.

FOURNIER, M.; ALMERAS, T.; CLAIR, B.; GRIL, J. Biomechanical action and biological functions. In: Gardiner B, Barnett J, Saranpää P, Gril J (eds) **The biology of reaction wood**. Springer, Berlin, pp 139-170, 2014.

FUNADA, R.; MIURA, T.; SHIMIZU, Y.; KINASE, T.; NAKABA, S.; KUBO, T.; SANO, Y. Gibberellin-induced formation of tension wood in angiosperm trees. **Planta**, Bonn, 227:1409–1414, 2008.

GARDINER B.; BARNETT, J.; SARANPÄÄ, P.; GRIL, J. **The biology of reaction wood**. Springer, Berlin, 2014, 274 p.

GIERLINGER, N.; SCHWANNINGER, M. Chemical imaging of poplar wood cell walls by confocal Raman microscopy, **Plant Physiol.**, Glasgow, 140: 1246–1254, 2006.

GORSHKOVA et al. Aspen tension wood fibers contain b-(1→4)-galactans and acidic arabinogalactans retained by cellulose microfibrils in gelatinous walls. **Plant Physiol.**, Glasgow, 169: 2048–2063, 2015.

GORSHKOVA, T.; CHERNOVA, T.; MOKSHINA, N.; AGEeva, M.; MIKSHINA, P. Plant 'muscles': fibers with a tertiary cell wall. **New Phytologist**, Bristol, 218. pp. 66-72, 2018.

GROOVER, A. Gravitropisms and reaction woods of forest trees – evolution, functions and mechanisms. **New Phytologist**, Bristol, 211:790–802, 2016.

HEIN, P. R. G.; CHAIX, G.; CLAIR, B.; BRANCHERIAU, L.; GRIL, J. Spatial variation of wood density, stiffness and microfibril angle along Eucalyptus trunks grown under contrasting growth conditions. **Trees**, Darmstadt, 30(3), 871–882, 2015.

HIGAKI, A.; YOSHINAGA, A.; TAKABE, K. Heterogeneous distribution of xylan and lignin in tension wood G-layers of the S1+G type in several Japanese hardwoods. **Tree Physiology**, Edmonton, 37: 1767–1775, 2017.

HILL, K. D.; JOHNSON, L. A. S. Systematic studies in the eucalypts. A revision of the bloodwoods, genus *Corymbia* (Myrtaceae). **Telopea**, New South Wales, v. 6, p. 185-504, 1995.

HILLIS, W. E. **Heartwood and tree exudates**. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1987, 268p.

HOLLENDER, C. A.; DARDICK, C. Molecular basis of angiosperm tree architecture. **New Phytologist**, Bristol, 206: 541–556, 2015.

HEJNOWICZ, Z.; ROMBERGER J. A. The common basis of wood grain figures is the systematically changing orientation of cambial fusiform cells. **Wood Sci Technol**, München, 13(2):89–96, 1979.

INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL – IBDF. **Norma para medição e classificação de toras de madeiras de folhosas**. Brasília: Brasiliana, 1984, 42 p.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS - IAWA. **Multilingual glossary of terms used in wood anatomy**, Verlagsanstalt Buchdruckere, Konkordia Winterthur, 1964, 186p.

JOUREZ, B. Tension wood. 1. Definition and distribution in the tree. **BASE: Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement**, Gembloux, 1:100–112, 1997.

JOUREZ, B.; RIBOUX, A.; LECLERCQ A. Anatomical characteristics of tension wood and opposite wood in young inclined stems of poplar (*Populus euramericana* cv ‘Ghoy’). **IAWA J.**, Beijing, 22(2):133–57, 2001a.

JOUREZ, B.; RIBOUX, A.; LECLERCQ, A. Comparison of basic density and longitudinal shrinkage in tension wood and opposite wood in young stems of *Populus euramericana* cv. Ghoy when subjected to a gravitational stimulus. **Canadian Journal of Forest Research**, Alberta, 31(10): 1676–1683, 2001b.

JOSELEAU, J.P.; IMAI, T.; KURODA, K.; RUEL, K. Detection in situ and characterization of lignin in the G-layer of tension wood fibres of *Populus deltoides*, **Planta**, Bonn, 219: 338–345, 2004.

KEDROV, G. B. Functioning wood. **Wulfenia**, Klagenfurt, 19: 57–95, 2012.

KUBLER, H. Growth stresses in trees and related wood properties. **Forestry Abstracts**, 48, 131-189, 1987.

KUBLER, H. Function of spiral grain in tress. **Tress**, Darmstadt, 5: 125-135, 1991.

LARSON, P. R. **The vascular cambium: development and structure**. Springer, Berlin Heidelberg, New York, 1994, 725 p.

LENEY, L. A technique for measuring fibril angle using polarized light. **Wood and Fiber**, Viena, 13: 13-16, 1981.

LIMA, J.T.; BREESE, M.C.; CAHALAN, C.M. Variation in microfibril angle in *Eucalyptus* clones. **Holzforshung**, Viena, 16: 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, Cienc. tecnol.**, Concepción, 16(4): 487-494, 2014.

LIMA, J. T.; SOARES, B. C. D.; GOULART, S. L. et al. **Deformações residuais e longitudinais em *Eucalyptus* sp. e *Corymbia* sp.** In: II Brazilian Congress of Wood Science and Technology, Belo Horizonte, 2015.

LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; CRUZ, C. R. Deformações residuais longitudinais decorrentes de tensões de crescimento em eucaliptos e suas associações com outras propriedades. **Revista Árvore**, Viçosa, 28: 107-116, 2004.

- LORENZI, H.; SOUZA, H. M.; TORRES, M. A. V.; BACHER, L. B. **Árvores exóticas no Brasil: madeireiras, ornamentais e aromáticas**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2003. 352 p.
- LOUREIRO, B. A VIEIRA, T. A. S.; COSTA, L. J.; SILVA, A. B.; DE ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F. Selection of superior clones of *Corymbia* hybrids based on wood and charcoal properties. **Maderas. Ciencia y tecnologia**, Concepción, 21(4): 619 – 630, 2019.
- LOURENÇON, T.; GATTO, D.; MATTOS, B.; DELUCIS, R. Propriedades físicas da madeira de *Corymbia citriodora* no sentido radial. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 369-375, 2013.
- MACHADO, J. S.; LOUZADA, J. L.; SANTOS, A. J. A.; NUNES, L.; ANJOS, O.; RODRIGUES, J.; SIMÕES, R. M. S. ; PEREIRA, H. Variation of wood density and mechanical properties of blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.). **Materials & Design**, Oxford, 56, 975-980, 2014.
- MATTHECK, C.; KUBLER, H. Wood - The Internal Optimization of Trees. Springer, Berlin, 1997, 144 p.
- MARCHESAN, R.; DE OLIVEIRA, D. N.; DA SILVA, R. C.; LORRAINY AZEVEDO DE CARVALHO, L. A.; GOMES, R. T.; ALMEIDA, V. C. Quality of charcoal from three species of the *Eucalyptus* and the *Corymbia citriodora* species planted in the south of Tocantins. **FLORESTA**, Curitiba, v. 50, n. 3, p. 1643 – 1652, 2020.
- MCDONALD, M. W.; BEAN, A. R. Note: a new classification in *Corymbia* ‘section Politaria’: *C. citriodora* subsp. *variegata* (Myrtaceae). **Austrobaileya**, Queensland, v. 5, n. 4, p. 735-736, 2000.
- MEDHURST, J.; DOWNES, G.; OTTENSCHLAEGER, M.; HARWOOD, C.; EVANS, R.; BEADLE, C. Intra-specific competition and the radial development of Wood density, microfibril angle and modulus of elasticity. **Trees**, Darmstadt, 26: 1771-1780, 2012.
- MÉLANIE et al.. Seção 1 (Biology and Biotechnology) – Chapter 3 (Wood formation in tress) In: e-book **Tree BIOTECHNOLOGY**, p. 56-111, 2014.
- MELLEROWICZ, E. J.; IMMERZEEL, P.; HAYASHI, T. Xyloglucan: The molecular muscle of trees. **Annals of Botany**, Toronto, 102: 659-665, 2008.
- MELO, L. E. L.; SILVA, J. R. M.; NAPOLI, A.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; NASCIMENTO, D. F. R. Study of the physical properties of *Corymbia citriodora* wood for the prediction of specific cutting force. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 44, n. 111, p. 701-708, 2016.
- MEYLAN, B.A. Measurement of Microfibril Angle by X-Ray Diffraction, **Forest Prod. J.**, LaGrange, 17: 15-58, 1967.
- MIKSHINA et al. Chapter 4: Cellulosic Fibers: Role of Matrix Polysaccharides in Structure and Function. In **Cellulose: Fundamental aspects**. p. 91-112, 2013.

MÜLLER, M.; BURGHAMMER, M.; SUGIYAMA, J. Direct investigation of the structural properties of tension wood cellulose microfibrils using microbeam X-ray fibre diffraction. **Holzforschung**, Viena, 60: 474–479, 2006.

NORTHCOTT, P. L. Is spiral grain the normal growth pattern? **Forestry Chronicle**, Ontario, 33:335-352, 1957.

NUGROHO et al. Gibberellin is required for the formation of tension wood and stem gravitropism in *Acacia mangium* seedlings. **Annals of Botany**, Toronto, 110: 887–895, 2012.

OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; FIEDLER, N. C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.34, n.5, p.929-936, 2010.

PARADEZ, A. R.; SOMERVILLE, C. R.; EHRHARDT, D. W. Visualisation of cellulose synthase demonstrates functional association with microtubules. **Science**, New York, 312: 1491–1495, 2006.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 3rd ed. New York, McGraw-Hill, 1970, 705 p.

PAWSEY, C. K. Lean and eccentricity in *Pinus radiata* (D. Don) in the southeast of South Australia. **Australian Journal of Forest Research**, Canberra, 2: 22–35, 1966.

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 113 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38), 2000.

PLOMION, C.; LEPROVOST, G.; STOKES, A. Wood formation in trees. **Plant physiology**, Glasgow, v. 127, p. 1513-1523, 2001.

QIU, D.; WILSON, I.W.; GAN, S.; WASHUSEN, R.; MORAN, G. F.; SOUTHERTON, S.G. Gene expression in *Eucalyptus* branch wood with marked variation in cellulose microfibril orientation and lacking G-layers. **New Phytol.**, Bristol, 179 (1) : 94-103, 2008.

RADOMSKI, M. I.; RIBASKI, J. **Excentricidade da medula em *Grevilea robusta* e *Corymbia citriodora* cultivados em sistema silvipastoril**. Comunicado Técnico EMBRAPA Florestas. Colombo. ISSN 1517-5030, 2010.

RAMOS, L. M. A.; LATORRACA, J. V. F.; PASTRO, M. S.; SOUZA, M. T.; GARCIA, R. A.; CARVALHO, A. M. Variação radial dos caracteres anatômicos da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden e idade de transição entre lenho juvenil e adulto. **Sci For**, Piracicaba, 39: 411-418, 2011.

REIS et al. *Corymbia citriodora*: estado da arte de pesquisas no Brasil [recurso eletrônico]. Dados eletrônicos - Colombo : Embrapa Florestas, (Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1980-3958 ; 255), 2013.

RUELLE, J. Morphology, Anatomy and Ultrastructure of Reaction Wood. In: Gardiner B, Barnett J, Saranpää P, Gril J (eds) **The biology of reaction wood**. Springer, Berlin, pp 13-35, 2014.

RUELLE, J.; CLAIR, B.; BEAUCHÊNE, J.; PRÉVOST, M.; FOURNIER, M. Tension wood and opposite wood in 21 tropical rain forest species. 2. Comparison of some anatomical and ultrastructural criteria. **IAWA Journal**, Beijing, 27 (4), pp.341-376, 2006.

RUELLE, J.; YOSHIDA, M.; CLAIR, B.; THIBAUT, B. Peculiar tension wood structure in *Laetia procera* (Poepp.) Eichl. (Flacourtiaceae). **Trees**, Darmstadt, 21: 345–355, 2007.

RUELLE, J., BEAUCHENE, J., THIBAUT, A., & THIBAUT, B. Comparison of physical and mechanical properties of tension and opposite wood from ten tropical rainforest trees from different species. **Annals of Forest Science**, Champenoux, 64(5), 503–510, 2007.

SCHULGASSER, K.; WITZTUM, A. The mechanism of spiral grain formation in trees, **Wood Sci Technol.**, München, 41:133–156, 2007.

SEGURA, TIAGO EDSON SIMKUNAS. **Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando à produção de celulose kraft branqueada**. 2015. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo – ESALQ – Piracicaba, 2015. 198 p.

SHAIN, L. Stem defense against pathogens. p. 383-406, B.L. Gartner, (ed.) in: **Plant stems: Physiology and functional morphology**. Academic Press, San Diego, 1995, 440 p.

SILVA, J. G. M.; VIDAURRE, G. B.; ARANTES, M. D. C.; BATISTA, D. C.; SORANSO D. R.; BILLO, D. F. Wood quality of African mahogany for lumber production. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, 44:181-190, 2016.

SINGLETON, R.; DEBELL, D. S.; MARSHALL, D. D.; GARTNER, B. L. Eccentricity and Fluting in Young—Growth Western Hemlock in Oregon. **Western Journal of Applied Forestry**, Tomsk, 18: 221–228, 2003.

SOUZA, M. A. M.; TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; ROSADO, S. C. S. Longitudinal residual deformation and your relationship with some characteristics of growth and of the wood in clones of *Eucalyptus*. **Floresta**, Curitiba, 33: 275-284, 2003.

SOUZA, M. T.; LIMA, J. T.; SOARES, B. C. D.; GOULART, S. L.; LIMA, L. C. Delimitação estatística dos lenhos juvenil e adulto de *Eucalyptus* e *Corymbia*. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 45, n. 116, p. 611-618, 2017.

STUART, S. A.; EVANS, R. X-ray diffraction estimation of the microfibril angle variation in

Eucalyptus wood. **Appita J.**, Victoria, 48: 197-200, 1995.

TAYLOR, A. M.; GARTNER, B. L.; MORRELL, J. J. (2002) Heartwood formation and natural durability – a review. **Wood and Fiber Science**, Viena, 34 (4), p. 587-611.

TIMELL, T. E. **Ultrastructure of the dormant and active cambial zones and the dormant phloem associated with the formation of normal and compression woods in *Picea abies* (L.) Karst.** SUNY CoIL Environ. SCI: For. Tech. Pub. 60, 1973, 94 pp.

TIMELL, T.E. **Compression wood in gymnosperms**. Berlin, Germany: Springer, 1986, 625 p.

TRUGILHO, P. F.; OLIVEIRA, J. T. S. Relationships and estimates of longitudinal growth stress in *Eucalyptus dunnii* at different ages. **Revista Árvore**, Viçosa, 32:723-729, 2008.

VAN DEN BULCKE et al. Potential of X-ray computed tomography for 3D anatomical analysis and microdensitometrical assessment in wood research with focus on wood modification. **International Wood Products Journal**, London, 4 (3): 183-190, 2013.

VITTI, A. M. S.; BRITO, J. O. Avaliação do rendimento e do teor de citronelal do óleo essencial de procedências e raças locais de *Eucalyptus citriodora*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, 56:145-154, 1999.

WARDROP, A. B. Reaction anatomy of arborescent angiosperms. In: Zimmermann MH (ed) **Formation of Wood in Forest Trees**. Academic, New York, pp 405-456, 1964.

WASHUSEN, R.; ADES, P.; VINDEN, P. Tension wood occurrence in *Eucalyptus globulus* Labill. I. The spatial distribution of tension wood in one 11-year-old tree. **Australian Forestry**, Adelaide, 65: 120-126, 2002.

WEBB, C. D. Variation of interlocked grain in Sweetgum. **Forest Prod. J.**, LaGrange, 19(8):45-48, 1969.

WESTING, A. H. Formation and function of compression wood in gymnosperms. **The Botanical Review**, New York, 31:381-480, 1965.

WILLIAMSON, R. L. Out-of-Roundness in Douglas-fir Stems. **Forest Science**, Starkville, 21: 365-370, 1975.

WILSON, B. F.; ARCHER, R. R. Reaction Wood: Induction and mechanical action. **Ann. Rev. Plant Physiol.**, Stanford, 28: 23-43, 1977.

WIMMER, R.; JOHANSSON, M. Effects of reaction wood on the performance of wood and wood-based products. In: Gardiner B, Barnett J, Saranpää P, Gril J (eds) **The biology of reaction wood**. Springer, Berlin, pp 225-248, 2014.

WOODCOCK, D.W.; SHIER, A.D. Wood specific gravity and its radial variations: the many ways to make a tree. **Trees**, Darmstadt 16:437–443, 2002.

YANG, J. L. **Loss of sawn recovery associated with growth stress and potential indicators of sawlog quality – A case study with *Eucalyptus globulus* Labill.** IUFRO/ITTO International conference on plantation Eucalyptus: The challenge in product development, November/December 2005, Zhanjiang, Guangdong province, China. Pp. 124–135, 2005.

YANG, J.; WAUGH, G. Growth stress, its measurement and effects. **Australian Forestry**, Adelaide, v. 64, n. 2, pp.127-135, 2001.

YOSHIDA, M.; OKUYAMA, T.; YAMAMOTO, H. Tree forms and internal stress III. Growth stresses of branches. **Mokuzai Gakkashi**, Tokio, 38: 663–668, 1992.