



JORDÃO CABRAL MOULIN

**Análise da ocorrência natural de
slip planes na parede celular de fibras da madeira de
*Eucalyptus grandis***

LAVRAS – MG

2017

JORDÃO CABRAL MOULIN

**ANÁLISE DA OCORRÊNCIA NATURAL DE
SLIP PLANES NA PAREDE CELULAR DE FIBRAS DA
MADEIRA DE *Eucalyptus grandis***

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 de Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. José Tarcísio Lima
Orientador

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva
Coorientador

**LAVRAS - MG
2017**

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

Moulin, Jordão Cabral.

Análise da ocorrência natural de *slip planes* na parede celular
de fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* / Jordão Cabral Moulin.
- 2017.

42 p. : il.

Orientador(a): José Tarcísio Lima.

Coorientador(a): José Reinaldo Moreira da Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2017.

Bibliografia.

1. Ultraestrutura da parede celular. 2. Defeito na parede celular.
3. Slip planes. I. Lima, José Tarcísio . II. Silva, José Reinaldo
Moreira da. III. Título.

JORDÃO CABRAL MOULIN

**ANÁLISE DA OCORRÊNCIA NATURAL DE
SLIP PLANES NA PAREDE CELULAR DE FIBRAS DA MADEIRA DE
*Eucalyptus grandis***

**ANALYSIS OF THE NATURAL OCCURRENCE OF
SLIP PLANES ON THE FIBERS CELL WALL OF *Eucalyptus grandis* WOOD**

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 de Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 15 de maio de 2017.

Dr. José Tarcísio Lima UFLA

Dr. José Reinaldo Moreira da Silva UFLA

Dra. Claudinéia Olímpia de Assis UFLA

Dra. Graziela Baptista Vidaure UFES

Dra. Marina Donária Chaves Arantes UFES

Prof. Dr. José Tarcísio Lima
Orientador

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva
Coorientador

**LAVRAS – MG
2017**

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira da Universidade Federal de Lavras – UFLA, pela oportunidade e por conceder a infraestrutura necessária para a conclusão deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão de bolsa de estudo e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais.

Ao meu orientador José Tarcísio Lima, pela amizade e orientação, apoio, dedicação, compreensão e principalmente os conhecimentos transmitidos.

Ao professor José Reinaldo Moreira da Silva pelo ensinamentos, apoio e amizade.

Às professoras Marina Donária Chaves Arantes e Graziela Baptista Vidaurre, pelos ensinamentos, apoio, conselhos e amizade que perpetuaram por toda a minha formação acadêmica.

À Claudinéia Olímpia de Assis por aceitar prontamente a participar da Banca Examinadora da Tese.

Aos técnicos Antônio Claret de Matos, Raisa Faetti e Héber Dutra Macedo pelo auxílio que foi importante para a concretização do trabalho.

À Empresa Vallourec Florestal Ltda, pela doação das árvores, tornando possível o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, Onofre e Roseni, pelo carinho e amor, e por tudo o que fizeram para que eu realizasse todas as conquistas em minha vida. A minha irmã Andressa, pelo carinho e apoio durante todo o trabalho.

Aos professores Paulo Hein e Paulo Fernando Trugilho pelos ensinamentos e amizade.

Aos meus amigos da Pós Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira Anna Carolina Almeida Andrade, Milene Teixeira e Rodrigo Nobre. Em especial as meninas da nossa salinha, Lidiane Costa Lima, Taiane Guedes, Fernanda Maria Guedes e Thaty Antunes, fiz com que me escutassem e discutissem sobre o meu trabalho e ajudaram bastante.

Aos amigos da Balalaika! Mônica, Abner, Javan, Jonnys, Junim e Raul, pela amizade e parceria durante todo esse período do doutorado.

RESUMO

Os *slip planes* são deformações que surgem na parede celular das fibras do lenho causados por tensões compressivas, sendo responsáveis pelo mecanismo de enfraquecimento estrutural inicial da madeira. O objetivo foi analisar a ocorrência natural de *slip planes* nas fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* em termos de sua caracterização, distribuição no tronco, associações com outras características da madeira e presença no perfil da fibra. Foram utilizadas três árvores de *Eucalyptus grandis* com 28 anos de idade. Dos caules foram cortados discos nas posições 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial. Cada segmento de caule foi cubado rigorosamente e sua densidade aparente média determinada. As massas relativas de cada quarto do caule foram determinadas em função dos respectivos volumes e densidade relativa aparente dos segmentos. Cada disco foi amostrado nas regiões comprimidas (central) e tracionadas (externas) do tronco, considerando a biodinâmica de tensões que caracteriza um tronco ereto, para medição do ângulo microfibrilar e determinação do ângulo dos *slip planes* (Asp), número de *slip planes* por milímetro (Nsp/mm) e Índice *slip planes* (Isp). O Isp foi definido como a expressão percentual do somatório das alturas dos *slip planes* em relação ao comprimento da fibra. Para analisar o perfil da fibra com a presença de *slip planes* foi utilizada a microscopia confocal. Foi possível constatar que: 1) a base do fuste, que suporta maior massa, apresentou maior Isp; 2) houve redução no Isp da base para o topo do fuste; no lenho comprimido a redução foi de 20,77 para 7,82%, enquanto no lenho tracionado, essa redução foi de 17,62 para 6,70%. Essa tendência de redução foi encontrada para Nsp/mm apenas no lenho comprimido, variando de 69,23 a 29,48 *slip plane*/mm; 3) comparando-se o lenho comprimido com o lenho tracionado, houve variação apenas no Asp, com o lenho comprimido apresentando 77,29° e o lenho tracionado 76,14°; 4) mediante observação em imagens 3D da microscopia confocal, a região do *slip plane* foi elevada em 75 nm em relação à superfície da fibra.

Palavras-chave: Ultraestrutura da parede celular. Defeito na parede celular. Deslocamento. Microscopia confocal.

ABSTRACT

The slip planes are deformations that arise in the cellular wall of the wood fibers caused by compressive stresses, being responsible for the mechanism of initial structural weakening of the wood. The objective of this work was to analyze the natural occurrence of slip planes in the fibers of *Eucalyptus grandis* wood in terms of their characterization, distribution in the stem, associations with other characteristics of the wood and presence on the fiber profile. Three 28-year-old *Eucalyptus grandis* trees were used. Of the stems were discs cut at positions 0, 25, 50, 75 and 100% of commercial height. Each stem segment was accurately cubed and its mean apparent density determined. The relative masses of each quarter of the stem were determined according to the respective volumes and relative density apparent from the segments. Each disc was sampled in the compressed wood (central) and tractioned wood (external) regions of the stem, considering the biodynamic stresses that characterize an erect stem, for microfibrillar angle measurement and determination of slip planes angle (Asp), number of slip planes by millimeter ($N_{sp/mm}$) and slip planes index (I_{sp}). The I_{sp} was defined as the percentage expression of the sum of the slip planes heights in relation to the fiber length. To analyze the fiber profile with the presence of slip planes, confocal microscopy was used. It was possible to verify: 1) the base of the stem, which supports larger mass, presented higher I_{sp} ; 2) there was reduction in the I_{sp} from the base to the top of the stem; in the compressed wood the reduction was from 20.77 to 7.82%, while in the tractioned wood the reduction was from 17.62 to 6.70%. This tendency of reduction was found for $N_{sp/mm}$ only in the compressed wood, ranging from 69.23 to 29.48 slip plane/mm; 3) comparing the compressed wood with the tractioned wood, there was variation only in the Asp , with the compressed wood presenting $77,29^\circ$ and the tractioned wood $76,14^\circ$; 4) by observation in 3D images of confocal microscopy, the slip plane region was raised at 75 nm in relation to the surface of the fiber.

Keywords: Cell wall ultrastructure. Defect in the cell wall. Dislocation. Confocal microscopy.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	11
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	12
3.1. Distribuição das tensões na árvore.....	12
3.2. Formação e desenvolvimento dos <i>slip planes</i> para as fibras adjacentes	12
3.3. Ocorrência natural e induzida do <i>slip plane</i> na madeira	14
3.4. Forças necessárias para geração dos <i>slip planes</i>	16
3.5. Quantificação dos <i>slip planes</i>	16
3.6. Ângulo do <i>slip plane</i>	19
3.7. Microscopia confocal.....	20
4. MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1. Amostragem	22
4.2. Desenvolvimento de metodologia para análise do índice <i>slip plane</i> e o ângulo do <i>slip plane</i>	23
4.2.1. Índice <i>slip plane</i>	23
4.2.2. Ângulo e número de <i>slip plane</i> por milímetro.....	25
4.3. Ângulo das microfibrilas (AMF) na camada S2	26
4.4. Densidade básica da madeira	26
4.5. Massa do fuste da árvore	26
4.6. Análise do perfil da fibra	27
4.7. Análise estatística dos <i>slip planes</i> nas diferentes posições no fuste da árvore.....	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1. Distribuição das características dos <i>slip planes</i> no fuste da árvore.....	30
5.2. Índice <i>slip plane</i>	31
5.3. Ângulo do <i>slip plane</i>	33
5.4. Número de <i>slip planes</i> por milímetro.....	34
5.5. Correlação das características dos <i>slip planes</i> com o ângulo microfibrilar, densidade básica e massa do fuste.....	35
5.6. Perfil da fibra com <i>slip planes</i>	36
6. CONCLUSÕES	40
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
APÊNDICE.....	44

1. INTRODUÇÃO

As propriedades químicas, anatômicas, físicas e mecânicas da madeira permitem a sua utilização para as mais diversas finalidades. As propriedades mecânicas podem variar em função da densidade básica, umidade, temperatura, ângulo da grã, estrutura anatômica, entre outras características da madeira.

Os elementos anatômicos da madeira podem variar em arranjos, formas e funções entre as espécies e na mesma árvore, o que irá resultar em diferentes comportamentos mecânicos. Entre as propriedades mecânicas, a propriedade elástica possibilita à madeira retomar a forma original após cessada a aplicação de tensão. Isso acontece quando a aplicação da carga ocorre abaixo do limite elástico. Acima deste limite ocorrem deformações plásticas e, em seguida, a ruptura da madeira. Contudo, ainda na fase elástica podem ocorrer deformações irreversíveis em escalas microscópicas, conhecidas como *slip planes* (DINWOODIE, 1968). Os *slip planes* são deformações que surgem na parede celular das fibras do lenho causadas por tensões compressivas. Os *slip planes* são os responsáveis iniciais pelo mecanismo de enfraquecimento estrutural da madeira (ROBINSON, 1920).

Os *slip planes* são caracterizados pelo seu número presente na fibra e por seus ângulos. É possível também caracterizá-los pela extensão que ocupam em relação ao comprimento da fibra. Estas características variam em função da espécie arbórea, entre a mesma espécie e até mesmo na própria árvore (DINWOODIE, 1974). De acordo com Coté e Hanna (1983) as fibras com maior espessura de parede tendem a apresentar menores quantidades de *slip planes* e, conforme Garland (1939), existe relação direta de seu ângulo com o ângulo microfibrilar.

Os *slip planes* podem alterar as propriedades físicas e mecânicas da madeira (LIMA, 1999), mas são necessárias mais pesquisas para verificar essa alteração. São poucos os estudos metodológicos para a quantificação dos *slip planes* e como alteram o perfil da fibra. Diferentes metodologias microscópicas podem ser utilizadas para observar os *slip planes*, a exemplo da microscopia de luz polarizada e microscopia eletrônica de varredura (THYGESSEN; BILDE-SØRENSEN; HOFFMEYER, 2006).

O estudo sobre a formação e ocorrência dos *slip planes* é importante para compreender o mecanismo de ruptura da madeira, pois ao aumentar gradativamente as forças de compressão paralela às fibras, o *slip plane* de uma fibra é propagado para as fibras vizinhas até surgir a marca de compressão e, por fim, a ruptura da madeira (DINWOODIE, 1966a). Além de reduzir a resistência mecânica da madeira, é reconhecido que estas deformações reduzem também a

resistência mecânica do papel (NYHOLM et al., 2001; TERZIEV; DANIEL; MARKLUND, 2008).

As causas para formação dos *slip planes* são as forças de compressão paralela às fibras e flexão (ROBINSON, 1920), cuja intensidade pode ser menor que a metade da força máxima que ela suporta (HOFFMEYER et al., 1993).

A árvore mantém-se em pé por meio do mecanismo de balanceamento das tensões de tração e compressão presentes no fuste. Os *slip planes* podem ser gerados a partir dessas forças compressivas e seu surgimento, assim, ocorreria de forma natural (BIENFAIT, 1926). Outros exemplos de forças que causam essa deformação na parede celular da fibra é a massa da própria árvore e forças do vento. Desde a derrubada da árvore até o uso final da madeira pode-se observar forças compressivas impostas à madeira capazes de ocasionarem os *slip planes* na fibra, de forma induzida.

Durante o processo de microtomia para produção de lâminas de madeira podem surgir *slip planes*, sendo, neste caso, considerados como artefatos. Em função disso as avaliações de *slip planes* a partir do uso de cortes histológicos de madeira devem ser cuidadosamente realizados para evitar a formação desses artefatos (DINWOODIE, 1966a).

2. OBJETIVOS

Analisar a ocorrência natural de *slip planes* nas fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* em termos de sua caracterização, distribuição no tronco e associações com outras características da madeira.

Para isso, estabeleceu-se também como objetivo o desenvolvimento de metodologia para avaliar a importância relativa dos *slip planes* nas fibras e para observá-los no perfil longitudinal das fibras.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Distribuição das tensões na árvore

A madeira é formada por diferentes tipos de células que caracterizam-se por serem de diferentes formas, dimensões e arranjos, realizam as funções básicas de sustentação, condução, armazenamento e outros. As células da madeira são geradas pelo tecido meristemático, por meio das divisões celulares dos meristemas cambial e apical. A função do tecido meristemático é influenciada pela taxa hormonal da árvore, está associada às condições ambientais e aos fatores genéticos (ESAU, 1974).

Dinwoodie (1966b) enfatizou as tensões compressivas longitudinais são localizadas principalmente na região central do fuste da árvore, enquanto que na região próxima à casca encontram-se as tensões de tração. De acordo com Biechele et al. (2009) o equilíbrio dessas tensões é responsável por manter a árvore em pé. Ao considerar a disposição simétrica do fuste da árvore, a transição entre as forças de tração e compressão é por volta de 2/3 do raio do tronco da árvore, medindo-se a partir da medula.

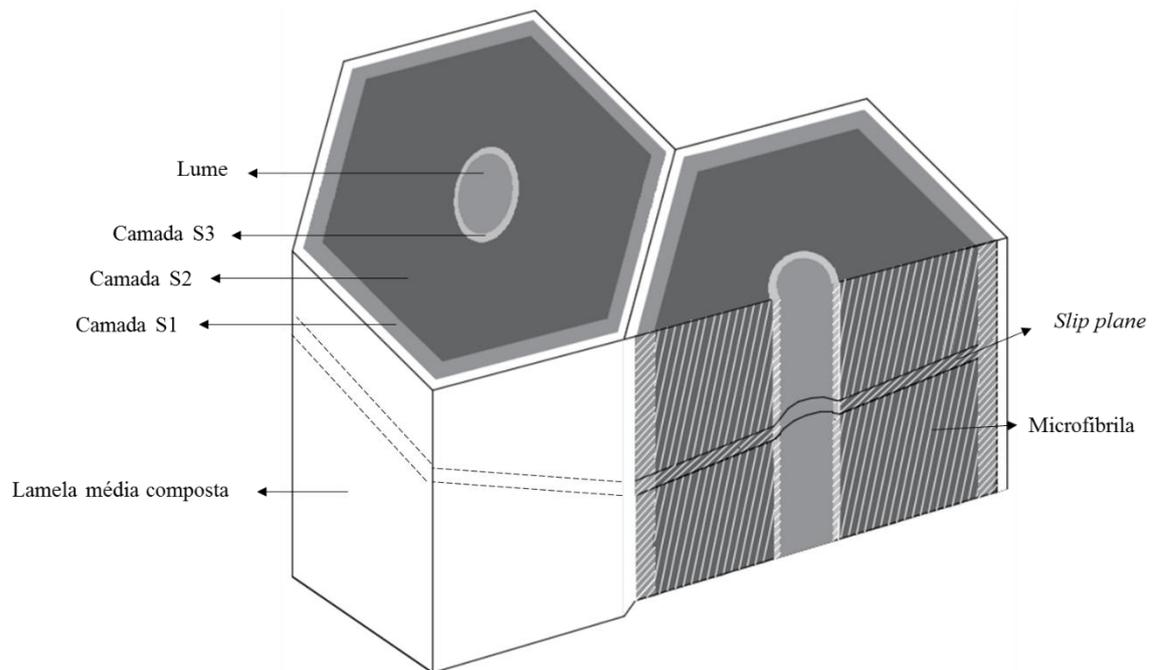
O mecanismo de sustentação da árvore é por meio de células alongadas que constituem grande parte do xilema secundário, sendo que no caso de coníferas as células responsáveis pela sustentação são os traqueídeos axiais, representando em média 95% do lenho, enquanto em folhosas as células responsáveis são as fibras e seu volume pode variar de 20 a 80% do lenho (PANSWIN; DE ZEEUW, 1980).

3.2. Formação e desenvolvimento dos *slip planes* para as fibras adjacentes

Alterações na anatomia da madeira ocorrem anteriormente a sua ruptura, como os *slip planes* (BIENFAIT, 1926), que caracterizam-se pelas alterações que ocorrem na parede celular das fibras (DINWOODIE, 1974).

A aplicação de forças paralelas às fibras causa o deslocamento da fibra com a célula vizinha (BIENFAIT, 1926), e com a ação de flexão da fibra ocorre o cisalhamento dos feixes de celulose dentro da parede celular (DINWOODIE, 1974), ou seja, nessa falha de estabilidade nas colunas de microfibrilas ocorre a sua reorientação e assim o surgimento de *slip plane* (HOFFMEYER et al., 1993). Na Figura 1 é possível visualizar a representação de um *slip plane* presente na parede da fibra de madeira.

Figura 1 – Representação do *slip plane* na parede secundária da fibra de madeira.

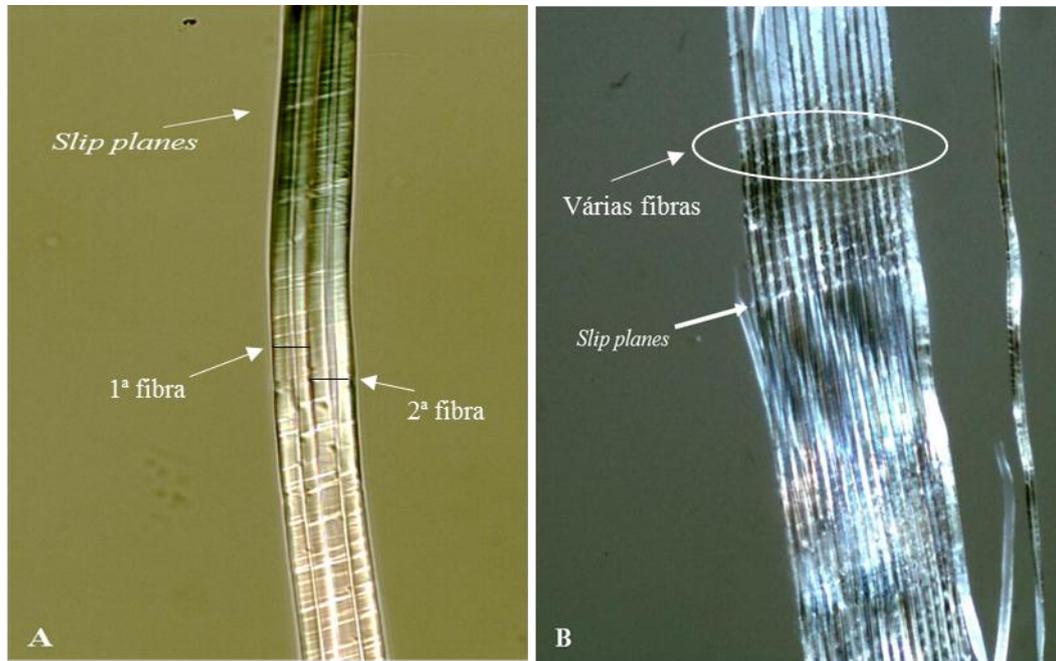


Fonte: Do autor (2017)

Coté e Hanna (1983) relataram que o surgimento do *slip plane* ocorre em três momentos seguidos: intercelular, intracelular e transversalmente à parede celular. O intercelular refere-se a separação da fibra com a lamela média; o intracelular é sobre a falha que ocorre dentro da parede secundária e muitas vezes na interface da camada S1 e S2; após estes dois estágios ocorre a falha transversalmente à parede celular, que é a ruptura de toda a parede da fibra.

O desenvolvimento dos *slip planes* para as fibras vizinhas é caracterizado por três estágios, sendo o primeiro constatado quando são ocasionados em poucas fibras vizinhas; o segundo estágio é quando ocorrem *slip planes* nas paredes celulares de uma série de fibras vizinhas e são conhecidos como “linha de compressão”; e posteriormente no último estágio são os chamados “favos de mel” (BIENFAIT, 1926). Os dois primeiros estágios podem ser visualizados na Figura 2.

Figura 2 – Primeiro estágio *slip planes* em duas fibras vizinhas (A) e linha de compressão (B) da madeira de *E. grandis*.



Fonte: Do autor (2017)

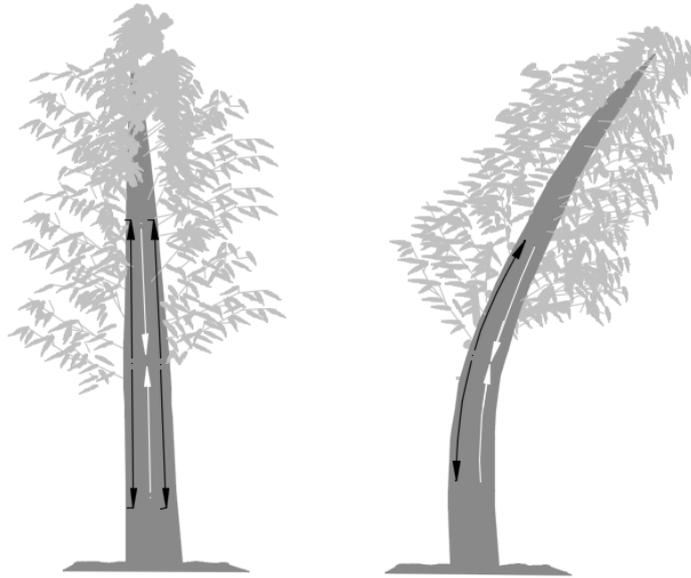
A densidade da madeira é influenciada diretamente pela espessura da parede da fibra, Garland (1939) ressaltou que madeiras com maiores densidades tendem a inibir o surgimento de linhas de compressão, ou seja, dificultam o surgimento e propagação dos *slip planes*.

3.3. Ocorrência natural e induzida do *slip plane* na madeira

As causas dos *slip planes* podem ser de formas naturais e induzidas. A sua ocorrência natural é ocasionado por fatores ambientais ou pelas características da própria árvore. Os *slip planes* causados de forma induzida são aqueles esforços ocasionados pela interferência do homem, como a derrubada da árvore e processamento da madeira.

Os *slip planes* originam-se naturalmente na árvore como resultado da ação de ventos que causam flexões do caule e conseqüentemente a tensão de compressão na região próxima da casca (FIGURA 3), além dos choques mecânicos ou mesmo de tensões de crescimento (ROBINSON, 1920; DINWOODIE, 1966b). A intensidade das tensões de crescimento está relacionada diretamente com o número dos *slip planes* da fibra de madeira de eucalipto, como afirmado por Wilkins e Alexiou (1991).

Figura 3 – Distribuição das tensões no fuste das árvores ereta (A) e inclinada pela ação do vento (B).



Legenda: Setas em branco indicam as tensões de compressão e as pretas de tração.

Fonte: Do autor (2017)

As características dos *slip planes* como ângulo e sua quantidade podem variar de acordo com a intensidade das forças de compressão paralela às fibras e flexão aplicadas na madeira, podendo ser de forma natural e induzida, variando também entre as espécies e até na mesma árvore (DINWOODIE, 1974).

As madeiras das árvores isentas de grandes estresses externos também possuem fibras com *slip planes* (DINWOODIE, 1966b). As causas são, por exemplo, a massa da copa da árvore e do fuste, que ocasionam compressão nas fibras da madeira. Lima (1999) observou a presença de *slip planes* de ocorrência natural no lenho de alburno de clones de *Eucalyptus*, sendo que no lenho de cerne interno foram encontradas maiores quantidades de fibras com *slip planes*.

A retratibilidade da madeira também causa os *slip planes* (BIENFAIT, 1926) e de acordo com Hoffmeyer et al. (1993) as variações das dimensões da madeira causadas pela umidade ocasionam tensões no interior da célula, implicando na geração dos *slip planes* na madeira quando sujeita à forças menores do que as que normalmente ocasionariam essas deformações.

Além dos *slip planes* serem ocasionados de forma natural, também são gerados de forma induzida, por exemplo, na derrubada da árvore e seu transporte, no processamento mecânico da

madeira, uso estrutural, na produção e utilização dos móveis de madeira, produção de cavacos e de celulose e papel.

3.4. Forças necessárias para geração dos *slip planes*

Robinson (1920) foi um dos pioneiros a relatar que os *slip planes* na parede celular da fibra são as causas iniciais no processo de enfraquecimento mecânico da madeira e que são devidos às forças de compressão paralela às fibras ou flexão. De acordo com Hoffmeyer et al. (1993) os *slip planes* podem ocorrer quando a madeira está sujeita a forças menores que a metade da força máxima que ela suportaria, mas isso não significa que ocorrerá deformação perceptível na madeira.

Dinwoodie (1978) estudou a tensão necessária para iniciar a geração dos *slip planes* em amostras do alburno de *Picea abies*, aplicando forças compressivas paralelas às fibras de 25, 35, 50, 65 e 80% da resistência máxima. Os *slip planes* foram analisados em lâminas com espessura de 50 µm e também em fibras individualizadas, sendo constatado que o início da geração dos *slip planes* ocorreu na carga de 25% da resistência máxima.

Para verificar a ocorrência de *slip planes* nas fibras da madeira de *Picea abies* com umidade de 11%, Hoffmeyer et al. (1993) aplicaram cargas de 30 e 50% da resistência máxima da madeira e não houve diferenças na quantidade de *slip planes* entre as duas cargas aplicadas. Os autores não sugeriram em seu trabalho, mas seria interessante realizar trabalho com maiores diferenças de cargas para verificar se ocorreriam diferenças significativas.

No trabalho de Lima et al. (2015) os *slip planes* foram analisados em lâminas de 10 µm e foi encontrada pequena relação entre a quantidade de *slip planes* tanto com o módulo de ruptura como com o módulo de elasticidade para a madeira de *Eucalyptus* sp. Os mesmos autores também encontraram maiores quantidades de *slip planes* na região do cerne que na região do alburno.

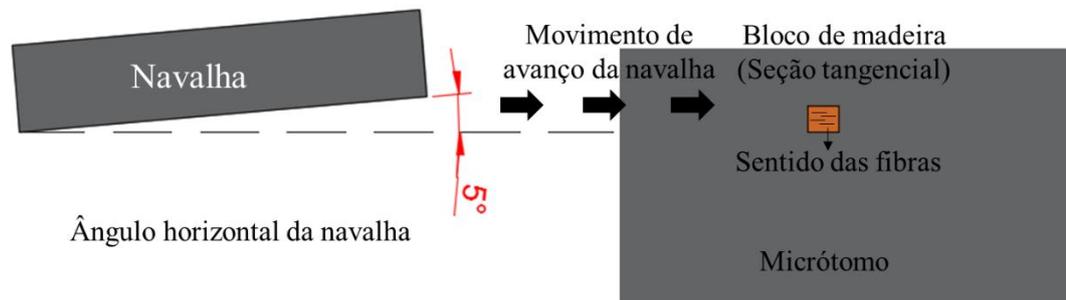
3.5. Quantificação dos *slip planes*

Os estudos sobre os *slip planes* nas fibras da madeira ocorrem desde 1920 com os principais objetivos de analisar os fatores causadores dessa deformação. Pouca ênfase foi dada para a quantificação dos *slip planes* em relação à intensidade dos diferentes fatores que os causam. Verifica-se carência também de relatos sobre as consequências que podem ocorrer na utilização da madeira.

Poucas pesquisas foram realizadas com o intuito metodológico de quantificar os *slip planes* na parede celular da fibra da madeira. Os estudos realizados a partir de 1920 pelos autores Robinson (1920), Dinwoodie (1966a), Keith e Côté (1968), Hartler (1969), Hartler e LÉMon (1969) tinham como principal objetivo verificar a geração de *slip planes* na parede celular da fibra causada durante a produção de lâminas histológicas no micrótomo.

Dinwoodie (1966a) e Hartler (1969) relataram que os *slip planes* gerados durante a microtomia são conhecidos como “artefatos”, e para evitá-los é necessário a utilização da navalha sempre afiada. Hartler (1969) indica a utilização do ângulo horizontal de 7°, em relação à direção das fibras e o menor ângulo de ataque possível. Dinwoodie (1966a) constatou que o número de *slip plane* é aumentado quando o ângulo horizontal da navalha é ampliado e indicou o valor de 5°. Na Figura 4 pode ser visualizado o esquema de representação do ângulo de 5° da navalha utilizada para a produção dos cortes histológicos de madeira.

Figura 4 – Representação da vista de topo do ângulo da navalha para produção de cortes histológicos para análise do *slip plane*.



Fonte: Do autor (2017)

Kibblewhite (1974) criou um método que utiliza a fibra individualizada para estimar o quanto os *slip planes* estão representados na fibra, resultando na Equação 1. Essa medida utiliza o comprimento da fibra, o número e os ângulos dos *slip planes*. Fatores são atribuídos aos ângulos dos *slip planes*, sendo que naqueles que variam de 10°-20° utilizam o fator 1 para

multiplicar pelo número de *slip plane*, os ângulos que variam de 21°-45° multiplica-se o número dos *slip planes* pelo fator 2; para os ângulos de 46°-90° multiplica-se o número de *slip planes* por 3; e o número de *slip planes* com ângulos de 91°-180° multiplica-se por 4. Após a análise dos números de *slip planes* e multiplicação pelos seus respectivos fatores, soma-se todos os resultados e em seguida divide-se o resultado pelo comprimento da fibra.

$$\text{Índice slip plane} = \frac{N_{10^{\circ}-20^{\circ}} + 2N_{21^{\circ}-45^{\circ}} + 3N_{46^{\circ}-90^{\circ}} + 4N_{91^{\circ}-180^{\circ}}}{\text{Comprimento da fibra (mm)}} \quad (1)$$

N: número de *slip planes* com ângulos no intervalo de 10°-20°, 21°-45°, 46°-90°, 91°-180°.
Fonte: Kibblewhite (1974).

A quantificação dos *slip planes* pela análise de imagens foram realizadas por Thygesen e Hoffmeyer (2005), por meio de fotografias das fibras individualizadas com os *slip planes* no microscópio de luz polarizada, posteriormente a quantificação foi embasada na relação da área ocupada pelos *slip planes* com a área da fibra.

Ander et al. (2008) e Thygesen (2008) utilizaram a hidrólise ácida para a quebra da fibra nos locais com a presença de *slip planes* e assim quantificá-los. O processo empregado por esses autores consiste na submersão de quantidades definidas de fibras em ácido clorídrico, que causa a quebra da fibra na região em que há presença de *slip planes*, gerando pequenas seções da fibra. Em seguida esse material é analisado no equipamento FibreMaster para obtenção da quantidade e comprimento dessas seções. Com base nesses resultados encontra-se a quantidade de *slip planes*. Neste procedimento também é possível utilizar a hidrólise enzimática, como realizado por Thygesen et al. (2014).

No trabalho de Lima et al. (2015) foram utilizadas dez lâminas de madeira com espessura de 10 µm e foram analisadas em microscópio de luz polarizada. Os *slip planes* foram classificados de acordo com o número visualizado no campo do microscópio, quando observado no campo do microscópio fibras com o valor abaixo de 50% de *slip planes* foram classificados como poucos, em torno de 50% como médios, e totalmente tomado por *slip planes* como muitos.

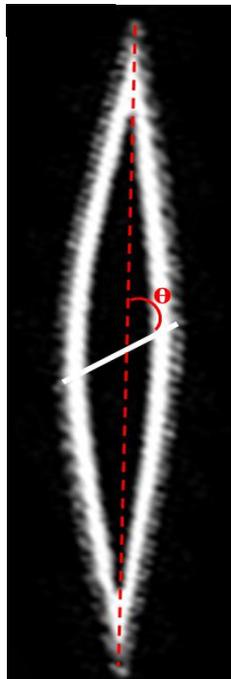
Os estudos para verificar as causas dos *slip planes* são imprescindíveis para compreender a integridade da fibra da madeira quando sujeita a diferentes forças compressivas

e de flexão, embora tais estudos precisem ser reforçados com a quantificação dos *slip planes* e associados com seus efeitos na utilização da madeira e seus derivados.

3.6. Ângulo do *slip plane*

Os *slip planes* ocorrem no sentido oblíquo ao eixo longitudinal da fibra formando determinado ângulo. De acordo com Garland (1939) este ângulo é relacionado diretamente com o ângulo microfibrilar. Sua análise é realizada ao longo da fibra, como pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Ângulo do *slip plane* na fibra.



Fonte: Do autor (2017).

De acordo com Dinwoodie (1974) o *slip plane* é uma característica que pode variar entre espécies e na própria árvore, como também nas diferentes características do lenho, como o inicial e tardio, de tração e compressão. Variações desses ângulos foram encontradas para diferentes espécies, sendo que o valor médio para *Pinus sylvestris* foi de 58,6°, *Larix decídua* foi 61,8°, *Pinus radiata* de 61,5° e *Pseudotsuga menziesii* de 62,1°. Nessas mesmas espécies foram obtidos maiores ângulos dos *slip planes* no lenho tardio em relação ao lenho inicial, os valores médios respectivos para os lenhos inicial e tardio foram 57,6° e 59,7° para *Pinus*

sylvestris, 60,1° e 63,6° para *Larix decídua*, 60,9° e 62,2° para o *Pinus radiata*, 60,9° e 62,2° para *Pseudotsuga menziesii*.

Dinwoodie (1974) ainda verificou os ângulos dos *slip planes* do lenho normal e de compressão, não encontrou diferenças significativas nas espécies de *Pinus sylvestris*, *Larix decídua*, *Pinus radiata* e *Pseudotsuga menziesii*.

3.7. Microscopia confocal

Os princípios da microscopia confocal foram estabelecidos por Marvin Minsky e nos recentes anos essa técnica tem sido amplamente utilizada em algumas áreas do meio científico, principalmente, na biológica e médica (MAUKO et al., 2009).

A microscopia confocal é uma técnica para aumentar o contraste das imagens utilizando a fluorescência, em materiais com diferentes espessuras. Com o princípio de inclusão de secções ópticas únicas, imagens de múltiplos comprimentos de onda, reconstruções tridimensionais e sequências de células e tecidos vivos. Possuem aspectos práticos na preparação das amostras e coleta de imagens (PADDOCK, 2000)

A microscopia confocal possui importante função ao permitir a utilização da fluorescência e a investigação de isolados componentes químicos no material em estudo, sendo possível também a observação do material em diferentes profundidades (CAI; JESSOP, 2009; PYNAERT et al., 2013).

Com a utilização de software específico acoplado ao microscópio confocal é possível capturar imagens da madeira em 2D, 3D e sobrepô-las com os diferentes componentes químicos analisados, como também a sobreposição em diferentes profundidades (KITIN et al., 2000).

A técnica de microscopia confocal na madeira é utilizada para analisar isoladamente os seus componentes químicos, como a lignina e a holocelulose. Donaldson et al. (2010) utilizaram esta técnica para visualizar a diferença de quantidade de lignina presente no lenho normal e de compressão na madeira de *Pinus radiata*.

A microscopia confocal tem se tornado uma boa ferramenta para estudar a anatomia da planta, possibilitando a visualização da madeira em diferentes profundidades em relação a espessura da sessão histológica (HEPLER; GUNNING, 1998; GRAY et al., 1999). Kitin et al. (2000) utilizaram a microscopia confocal para analisar a estrutura do câmbio da madeira da espécie *Kalopanax pictus*. Kitin et al. (1999) usaram a mesma técnica para analisar as dimensões dos elementos anatômicos do lenho inicial e tardio da madeira *Kalopanax pictus*.

Batchelor, Conn e Parker (1997) analisaram o ângulo microfibrilar da madeira de *E. nitens* utilizando a microscopia confocal.

O *slip plane* caracteriza-se por modificar a estrutura física da fibra com a formação de “vinco” e é possível visualiza-lo por meio das funções do microscópio confocal, utilizando diferentes profundidades e principalmente imagens tridimensionais.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Amostragem

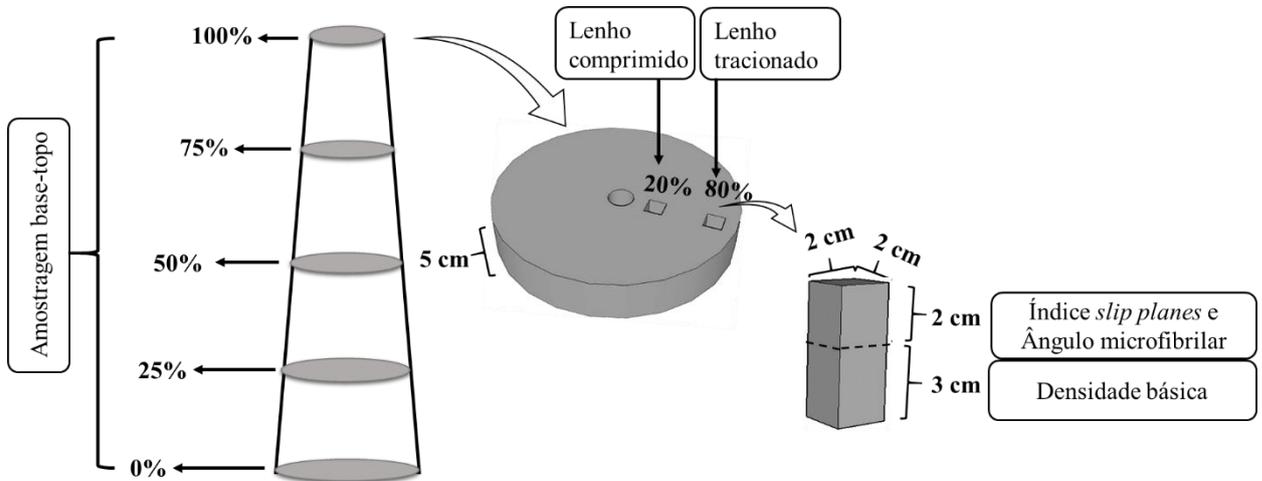
As árvores foram provenientes da Fazenda Itapuã, propriedade da empresa Vallourec Florestal Ltda, localizada na região de Paraopeba, Minas Gerais, com latitude de 19° 16' 28" S e longitude de 44° 24' 15" W. De acordo com a Köppen e Geiger a precipitação média anual é de 1.244 mm e a temperatura média de 21,8°C. Os solos foram classificados como Latossolo Vermelho-Escuro, Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo-Amarelo (BALDUINO et al., 2005).

Foram utilizadas três árvores com fustes não tortuosos de *Eucalyptus grandis* com idade de 28 anos plantadas em espaçamento de 3 x 2 m. Foram utilizadas árvores com alturas e diâmetros semelhantes. Com alturas de 24,70; 25,60 e 23,40 m e seus respectivos diâmetros com casca na base da árvore de 32,50; 33,70 e 32,60 cm.

Nos fustes foram retirados discos com 5 cm de espessura nas posições de 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial, sendo considerado o diâmetro mínimo de 5 cm com casca. Considerando a biodinâmica de tensões que caracteriza um tronco ereto, foram amostrados no sentido medula-casca dos discos, o lenho comprimido na distância de 20% (central) e o lenho tracionado na distância de 80% (externa).

De cada lenho comprimido e tracionado foram retiradas amostras sobrepostas, com dimensões de 2 x 2 x 2 cm para análise dos *slip planes* e ângulo microfibrilar, outra amostra com dimensões de 2 x 2 x 3 cm para determinação da densidade básica (FIGURA 6).

Figura 6 – Representações dos discos nas diferentes posições no sentido base-topo para retirada das amostras para análise dos *slip planes*, ângulo microfibrilar e densidade básica.



Fonte: Do autor (2017).

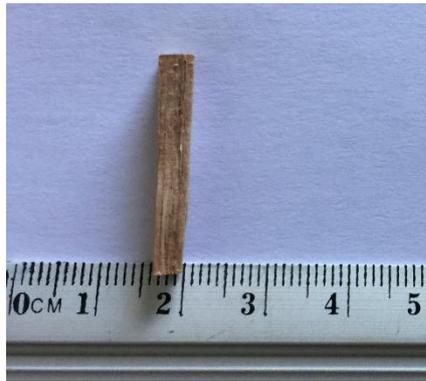
4.2. Desenvolvimento de metodologia para análise do Índice *slip planes* e o ângulo dos *slip planes*

4.2.1. Índice *slip planes* (Isp)

Ao observar os *slip planes* na fibra da madeira foi possível constatar que variam em quantidades, direções e inclinações em relação ao eixo longitudinal da fibra. Para verificar o quanto os *slip planes* estão representados na fibra e assim desenvolver o Índice *slip plane* foram analisados todos os *slip planes* na fibra. Utilizaram-se fibras com presença de pelo menos um *slip plane*. Para isso foram utilizadas fibras individualizadas e a visualização dos *slip planes* foi realizada em microscópio de luz polarizada.

No processo de individualização das fibras procurou-se evitar a geração de artefatos, para isso foi utilizado o formão para exercer pressão no sentido paralelo das fibras para causar o fendilhamento da madeira e assim a formação de palitos de madeira com dimensões em torno de 4 x 4 x 30 mm (espessura x largura x comprimento), a espessura desses palitos é maior que daqueles gerados no método convencional de maceração (FIGURA 7).

Figura 7 – Palitos de madeira para obtenção das fibras para análise do Índice *slip planes*.



Fonte: Do autor (2017)

A dissociação das fibras seguiu o método proposto por Franklin (1945). Os palitos de madeira foram transferidos para recipientes contendo solução macerante composta por ácido acético glacial e peróxido de hidrogênio, na proporção 1:1. Depois de serem vedadas, foram conduzidas para a estufa e permaneceram à temperatura de 60°C por 24 horas. Posteriormente, o macerado foi lavado e as lâminas temporárias preparadas com glicerina.

A visualização do *slip planes* na fibra foi possível por meio do polarizador acoplado ao microscópio e foram necessários ajustes em conformidade com o foco para conseguir visualizar cada *slip plane*, ou seja, um determinado ajuste do polarizador e foco pode não servir para observar todos os *slip planes* presentes na fibra.

As fibras foram colocadas em lâminas temporárias e analisadas no microscópio com mesa giratória, com escala de 0 a 360°. A mesa foi girada de forma que a fibra ficasse alinhada verticalmente e com o auxílio do software analisador de imagens Image Pros Plus associado ao microscópio Olympus BX-51 foi medida a largura da fibra e o ângulo do *slip plane* (FIGURA 8A) no aumento de 400×, esses dados foram aplicados na Equação 2 para obtenção da altura que o *slip plane* representa em relação ao comprimento da fibra.

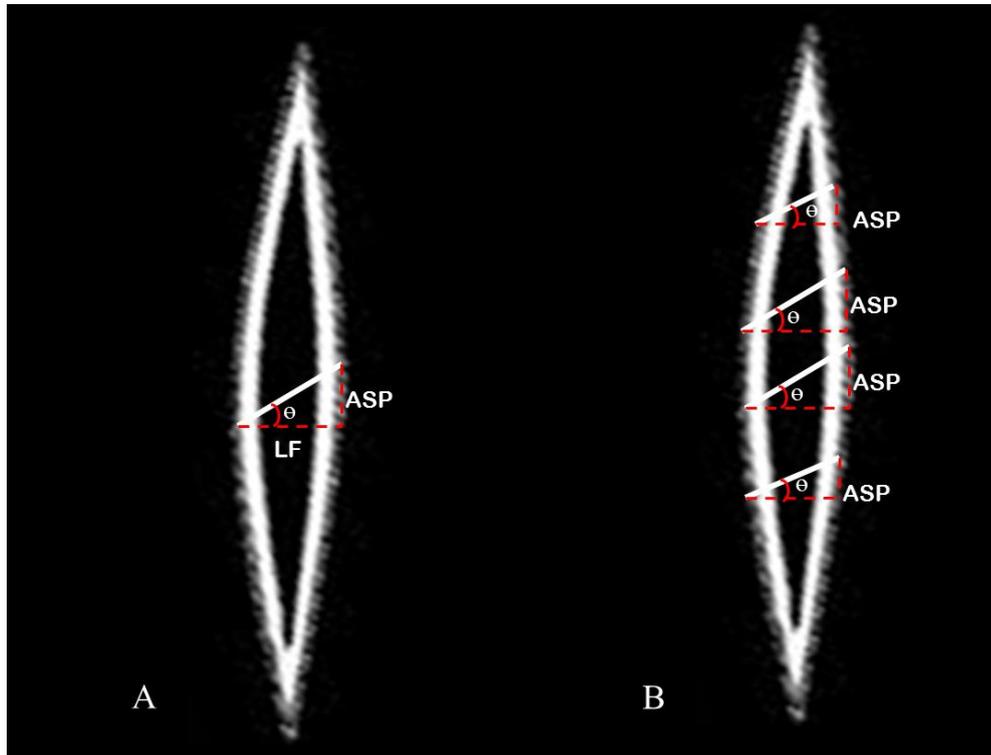
$$ASP = LF \times \tan \theta \quad (2)$$

ASP: Altura que o *slip plane* representa em relação ao comprimento da fibra (μm);

LF: Largura da fibra (μm);

θ : Ângulo do *slip plane*.

Figura 8 – Medições do ângulo do *slip plane* e largura da fibra para (LF) o cálculo da altura que o *slip plane* representa em relação ao comprimento da fibra (ASP).



Legenda: A: medições para um *slip plane* presente na fibra; B: exemplo de uma fibra com quatro *slip planes* e as medições dessas deformações presentes na fibra.

Fonte: Do autor (2017).

O *slip plane* normalmente ocorre em várias unidades na fibra, na Figura 8B visualiza-se o exemplo de uma fibra com quatro *slip planes*. O Índice *slip planes* foi determinado como o somatório de todas as alturas dos *slip planes* (ASP) presentes na fibra, dividido pelo comprimento da fibra (EQUAÇÃO 3). Foi realizada a média do Índice *slip planes* de 20 fibras para caracterizar o lenho.

$$I_{sp} (\%) = \left(\frac{\Sigma ASP}{\text{Comprimento da fibra}} \right) \times 100 \quad (3)$$

4.2.2. Ângulo e número de *slip planes* por milímetro

Nas mesmas fibras analisadas para o Índice *slip planes* também foram mensurados os ângulos e número de *slip planes* por milímetro. Para o cálculo do Índice *slip planes* utilizou-se

o ângulo do *slip plane* no sentido perpendicular ao eixo longitudinal da fibra, contudo na literatura a caracterização do ângulo do *slip plane* é em relação ao sentido longitudinal da fibra.

Para corroborar com as pesquisas já realizadas sobre o ângulo do *slip plane* utilizou-se também no presente estudo o ângulo do *slip plane* em relação ao sentido longitudinal da fibra. Para isso foi realizada a cotangente do ângulo do *slip plane* obtido na análise do Índice *slip plane*.

Para o cálculo do valor médio do ângulo dos *slip planes* realizou-se a média dos ângulos de todos os *slip planes* presentes na fibra.

O número de *slip planes* por milímetro foi determinado por meio da relação entre o número total de *slip planes* na fibra e o seu comprimento.

4.3. Ângulo das microfibrilas (AMF) na camada S2

Para a determinação do ângulo das microfibrilas cortes histológicos longitudinais tangenciais de 8 µm de espessura foram preparados com intuito de separar a fibra em duas partes e em seguida transferidos para recipientes contendo solução macerante (ácido acético glacial e peróxido de hidrogênio, na proporção 1:1 - FRANKLIN, 1945). Após serem vedadas, as amostras foram conduzidas para a estufa e permaneceram a temperatura de 60°C por 12 horas.

Com a alíquota do macerado de fibras de cada amostra foram montadas lâminas histológicas e foi utilizado microscópio de luz polarizada Olympus BX51 com mesa giratória, com escala de 0 a 360° (LIMA et al., 2004). A mesa foi girada de forma que as fibras ficassem alinhadas verticalmente em relação à linha capilar da ocular do microscópio. Em seguida, a mesa foi girada até que o fundo da fibra ficasse escuro, posição de máxima extinção da luz. O ângulo indicado no goniômetro da mesa giratória foi registrado, referente o AMF. Foram analisadas 20 fibras de cada amostra sob aumento de 400×.

4.4. Densidade básica da madeira

A determinação da densidade básica da madeira foi determinada conforme a Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 11941 (ABNT, 2003).

4.5. Massa do fuste da árvore

Para o cálculo da massa do fuste foram utilizadas quatro seções do fuste. Os volumes e densidades aparentes da madeira e da casca de cada seção da árvore foram utilizados para o

cálculo da massa do fuste. Para obtenção do volume de cada seção utilizou-se a equação de *Smalian*, sendo realizado o cálculo para a seção com e sem casca, pela diferença encontrou-se o volume de casca.

Para estimar a maior massa na sua máxima umidade, buscando referendar a maior massa que o fuste poderá atingir, saturou-se as cunhas opostas de cada disco e foi determinada a densidade aparente de acordo com o método da NBR 11941 (ABNT, 2003), para cada disco foi considerada a média das duas cunhas opostas.

O mesmo procedimento foi adotado para a casca, sendo obtida uma amostra de cada cunha que também foram saturadas e determinadas a densidade aparente.

Os resultados do volume e densidade aparente da madeira e casca foram utilizados nas Equações 4, 5 e 6 para os cálculos das massas das seções e posteriormente massa total do fuste.

$$MM = Vm(\text{seção}X) \times DAM \quad (4)$$

MM = massa de madeira na seção X (verde) (kg)

Vm = Volume de madeira na seção X (m³)

DAM = Densidade aparente média da madeira dos discos da seção analisada (kg m⁻³)

$$MC = Vc(\text{seção}X) \times DAC \quad (5)$$

MC = massa da casca na seção X (verde) (kg)

Vc = Volume de casca da seção X (m³)

DAC = Densidade aparente média da casca dos discos da seção X (kg/m³)

$$\text{Massa da seção} = MM + MC \quad (6)$$

A massa do fuste total foi obtida pela soma das massas de todas as seções. Para verificar a massa suportada em cada posição do sentido base-topo utilizou-se a soma das massas (madeira mais casca) das seções sobrepostas à posição analisada.

4.6. Análise do perfil da fibra

A microscopia confocal foi utilizada para verificar o perfil da superfície da fibra individualizada com a ocorrência de *slip plane*.

As fibras foram colocadas em lâminas temporárias e as imagens de fluorescência foram feitas com o microscópio Laser Confocal LSM780 Zeiss Observer Z.1 (FIGURA 9) com o

software Zen 2012. A celulose das fibras foi marcada com S4B e foram visualizadas utilizando o detector Ch2, Beam splitter MBS 514 nm, e o filtro de emissão para 568 a 594 nm. Diversos planos focais foram capturados (z-stack) para sobreposição das informações oriundas de diferentes profundidades de campo com a ferramenta *Maximum Intensity Projection*, originando uma imagem final 2D com profundidade de campo. As imagens também foram utilizadas para construir uma representação em 3D.

Figura 9 – Microscópio Laser Confocal LSM780 Zeiss Observer Z.1.



Fonte: Do autor (2017)

4.7. Análise estatística dos *slip planes* nas diferentes posições no fuste da árvore

A análise estatística das características dos *slip planes* foi realizada em 20 fibras por amostra, dos lenhos comprimido e tracionado, presentes em cinco posições no sentido base-topo (10 amostras por árvore), utilizando três árvores como repetições.

Na avaliação do experimento adotou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC) disposto em esquema fatorial com dois fatores (lenhos no sentido base-topo x lenhos comprimido e tracionado). Para os lenhos comprimidos e tracionado foi empregada análise de variância, enquanto que para os lenhos no sentido base-topo foi utilizada a regressão linear simples.

Para avaliar as correlações existentes entre a massa do fuste, densidade básica e ângulo microfibrilar com o Índice *slip planes*, ângulo e número de *slip planes* por milímetro foi empregada a matriz de correlação de Pearson a 5% de significância.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Distribuição das características dos *slip planes* no fuste da árvore

O Índice *slip planes* (Isp), ângulo (Asp) e número de *slip planes* por milímetro (Nsp/mm) ocorreram de forma independente nos sentidos base-topo e entre os lenhos comprimido e tracionado do fuste, ou seja, não houveram interações entre esses fatores (TABELA 1). No sentido da base ao topo foi verificada variação significativa apenas do Isp e Nsp/mm. Entre os lenhos comprimido e tracionado foi constatada variação significativa apenas do Asp.

Tabela 1. Resumo da análise de variância do Índice *slip planes* (Isp), ângulo dos *slip planes* (Asp) e do número de *slip planes* por milímetro (Nsp/mm) na madeira de *E. grandis* aos 28 anos.

Fator de variação	Quadrado Médio			
	GL	Isp	Asp	Nsp/mm
Lenhos da base-topo (BT)	4	2410,22*	23,38	16342,45*
Lenhos comprimido e tracionado (LCT)	1	8,36	196,47*	2001,64
BT*LCT	4	139,46	11,04	2678,33
Resíduo	590	71,77	8,74	1728,89
Total	599			

*Significativo pelo teste F, a 5% de probabilidade; GL: graus de liberdade

Os valores médios do Índice *slip planes* foram 14,41% para o lenho comprimido e 14,17% para o lenho tracionado (TABELA 2), o ângulo dos *slip planes* foi 77,29° e 76,14° respectivamente nos lenhos comprimido e tracionado, nestes mesmos lenhos os valores médios do número de *slip planes* por milímetro foram de 50,21 e 46,56 respectivamente.

Os menores coeficientes de variação foram dos ângulos dos *slip planes*, evidenciando que o alto valor do coeficiente de variação do Índice *slip planes* foi decorrente da amplitude das quantidades de *slip planes* nas vinte fibras analisadas das amostras de cada posição do sentido base-topo nos lenhos comprimido e tracionado.

Tabela 2. Valores médios do Índice *slip planes* (Isp), ângulo (Asp) e número de *slip planes* por milímetro (Nsp/mm) da madeira de *E. grandis* aos 28 anos.

Posição base-topo (%)	Isp		Asp		Nsp	
	LC	LT	LC	LT	LC	LT
0	20,77	17,62	77,21	76,61	69,23	54,97
CV (%)	(41,98)	(45,85)	(13,81)	(23,18)	(42,85)	(52,81)
25	17,18	16,51	78,42	76,29	63,29	50,12
CV (%)	(58,13)	63,90	(23,04)	(18,47)	55,16	(63,65)
50	12,66	14,83	76,57	75,86	42,28	46,99
CV (%)	(70,11)	63,07	(20,75)	(26,09)	(71,31)	(67,99)
75	13,59	15,19	77,08	75,80	46,79	46,32
CV (%)	(60,63)	65,64	(23,72)	(17,25)	(63,37)	(68,14)
100	7,82	6,70	77,15	76,14	29,48	34,42
CV (%)	(51,55)	58,83	(28,33)	(24,12)	(67,59)	(43,57)
Média	14,41	14,17	77,29	76,14	50,21	46,56

CV (%): Coeficiente de variação; LC: Lenho comprimido; LT: Lenho tracionado.

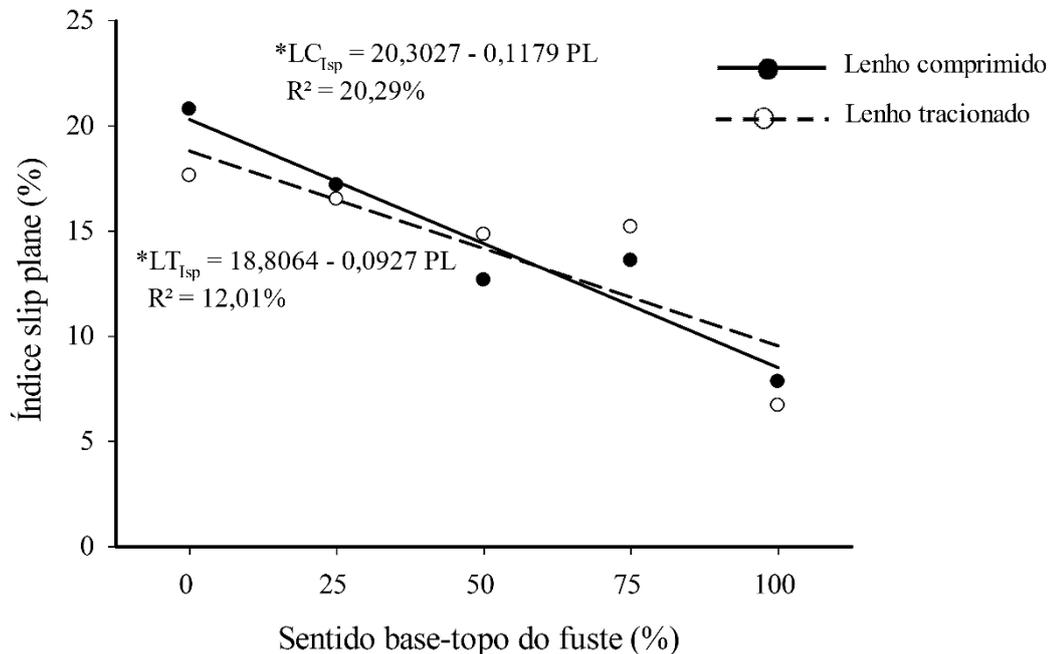
5.2. Índice *slip planes* (Isp)

A regressão para verificar a variação da base ao topo do Índice *slip planes* foi significativa para os lenhos comprimido e tracionado (FIGURA 10). Os coeficientes de variação da regressão entre os dois lenhos foram distintos, uma vez que o lenho tracionado apresentou menor coeficiente em função da menor variação entre as posições de 25 a 75% (FIGURA 10).

Os valores do Índice *slip planes* foram elevados baseando-se em relatos da literatura como imagens publicadas e testes preliminares. Os valores chegam até a 20,77% no lenho comprimido na base da árvore, isso pode estar relacionado à idade e ao tamanho da árvore, uma vez que a árvore está sujeita a esforços naturais durante toda a sua vida.

Com a ocorrência de *slip planes* na árvore em pé, deduz-se que essas deformações ocorreram por causas naturais. Lima (1999) também verificou a presença de *slip planes* causados de forma natural nos clones de *Eucalyptus* plantados no Brasil.

Figura 10 – Índice *slip planes* médio no sentido base-topo do fuste da madeira de *E. grandis* aos 28 anos, nos lenhos comprimido e tracionado.



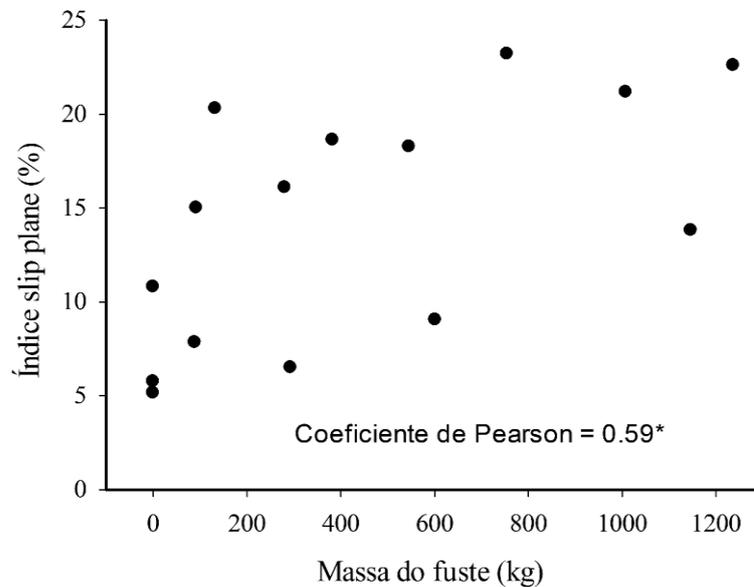
Legenda: LC_{Isp} : Isp no lenho comprimido; LT_{Isp} : Isp no lenho tracionado; LP: posição no sentido base-topo estimada. *Regressão significativa a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2017)

O comportamento do Índice *slip planes* foi de redução no sentido da base para o topo, no lenho comprimido essa variação foi de 20,77 para 7,82%, no lenho tracionado foi de 17,62 para 6,70%. Visto que os *slip planes* causam o enfraquecimento da madeira, infere-se que a base da árvore está mais susceptível a ruptura e em função disso deve ser tomado cuidado ao empregar estas madeiras quando exigida resistência mecânica, como em vigas na construção civil. De acordo com Nyholm et al. (2001) e Terziev, Daniel e Marklund (2008) os *slip planes* reduzem a resistência do papel, verifica-se que o papel a ser produzido a partir do lenho da base da árvore do presente estudo apresentará menor resistência.

A tendência da redução do Índice *slip planes* com o aumento da altura da árvore está relacionada com a massa do fuste, que promove força de compressão paralela às fibras e estão distribuídas em diferentes quantidades ao longo do fuste. Na Figura 11 visualiza-se a correlação entre o Índice *slip planes* e as diferentes massas presentes no fuste (APÊNDICE 4).

Figura 11 – Relação da massa do fuste das três árvores de *E. grandis* aos 28 anos com o Índice *slip planes*.



Legenda: *significativo a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2017)

A massa do fuste correlacionou significativamente com o Índice *slip planes* (coeficiente de Pearson de 0,59), corroborando com a afirmação de Dinwoodie (1974), que relatou que a massa da árvore influencia na geração dos *slip planes*.

A geração do *slip plane* ocorre devido as forças de compressão paralela às fibras, como o Índice *slip planes* foi igual entre os lenhos comprimido e tracionado, constata-se que em algum momento do lenho tracionado houve a presença de forças compressivas. Isto pode ser causado pelo movimento de flexão da árvore ocasionado pela ação do vento que causa a modificação da distribuição das tensões no fuste da árvore, havendo presença de esforços compressivos próximos da casca.

5.3. Ângulo dos *slip planes* (Asp)

Os ângulos dos *slip planes* foram iguais estatisticamente em todas as posições do sentido base-topo do fuste, tanto para o lenho comprimido quanto para o lenho tracionado. Contudo houve diferença significativa do ângulo dos *slip planes* entre os dois lenhos (TABELA 1), o maior ângulo foi do lenho comprimido, com valor de 77,29°, enquanto no lenho tracionado foi 76,14°, verificando-se a variação do ângulo dos *slip planes* na mesma árvore, como também constatado por Dinwoodie (1974), que encontrou maior ângulo dos *slip planes* no lenho tardio

em comparação com o lenho inicial nas espécies *Pinus sylvestris*, *Larix decídua*, *Pinus radiata* e *Pseudotsuga menziesii*.

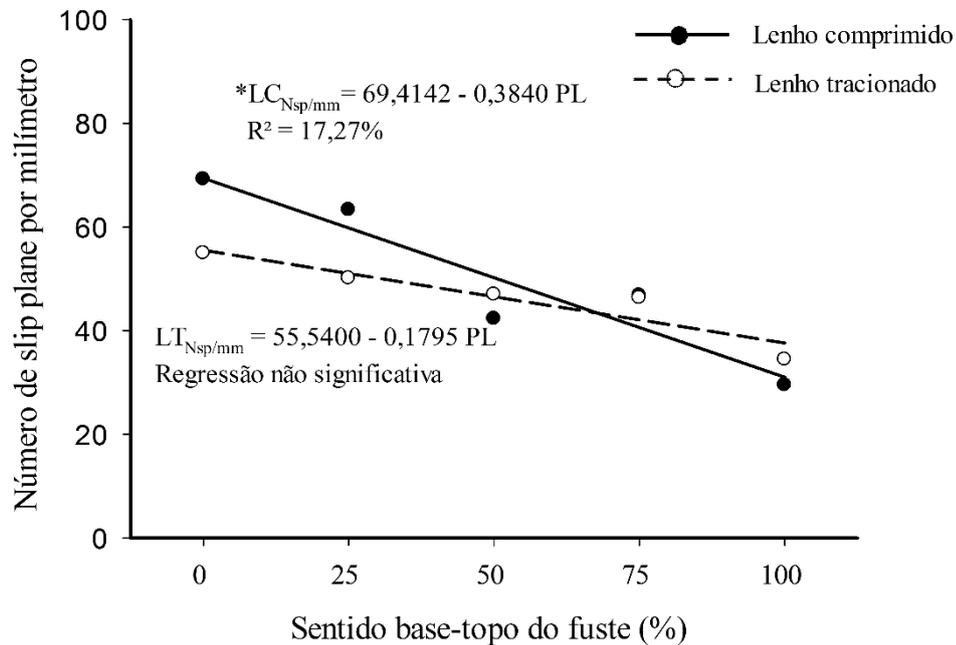
Os ângulos dos *slip planes* do eucalipto do presente trabalho foram superiores aos das espécies estudadas por Dinwoodie (1974), que encontrou os ângulos médios de 59,40° para a madeira de *Picea abies*, 55,80° para *Pinus sylvestris*, 65,70° para *Larix decídua*, 50,15° para *Tsuga heterophylla*, 64,70° para *Fagus sylvatica* e 68,10° para a *Fraxinus excelsior*. Coté e Hanna (1983) encontram variação de 45 a 60° para a madeira de Southern pine (yellow pine), Kibblewhite e Brookes (1977) encontraram 66,00° para a madeira de *Nothofagus menziesii* (Silver beech) e 59,60° para a madeira de *Nothofagus truncata* (hard beech). Essa variação dos ângulos dos *slip planes* corrobora com Dinwoodie (1974), que ressaltou a existência de diferentes ângulos entre as espécies arbóreas.

5.4. Número de *slip planes* por milímetro (Nsp/mm)

O número de *slip planes* por milímetro variou significativamente apenas no lenho comprimido, havendo a tendência de redução no sentido da base para o topo do fuste (FIGURA 12), cujos valores foram de 69,23 para 29,48 *slip planes*/mm. No lenho tracionado o valor médio foi de 46,56 *slip planes*/mm (APÊNDICES 5 e 6).

O resultado do Nsp/mm e Isp foram no sentido da base para o topo foram diferentes para o lenho tracionado. A igualdade do Nsp/mm nas diferentes posições no sentido base-topo do lenho tracionado pode estar relacionada a não utilização do ângulo do *slip plane*, uma vez que essa característica é utilizada para verificar o quanto o *slip plane* está representado na fibra em função do seu comprimento.

Figura 12 – Número médio de *slip planes* por milímetro no sentido base-topo do fuste, nos lenhos sob tensões de comprimido e tracionado de *E. grandis* aos 28 anos.



Legenda: $LC_{Nsp/mm}$: Nsp/mm no lenho próximo da medula; $LT_{Nsp/mm}$: Nsp/mm no lenho próximo da casca; LP: posição da base-topo estimada. *Regressão significativa a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2017)

Mesmo não havendo diferença estatística do Asp no sentido base-topo do fuste e nem no Nsp/mm do lenho tracionado, evidencia-se que a pequena diferença numérica dos ângulos junto com a quantidade de *slip planes* na fibra implicará no quanto o *slip plane* está representado na fibra, constando a variação estatística do Isp no sentido base-topo no lenho tracionado e lenho comprimido.

5.5. Correlação das características dos *slip planes* com o ângulo microfibrilar, densidade básica e massa do fuste

A correlação do Isp com o Nsp/mm foi alta (0,63), isso significa que a elevação do número de *slip planes* causará aumento no Isp (TABELA 3). O Asp correlacionou-se diretamente com o Nsp/mm, uma vez que o maior ângulo implica na menor ocupação de espaço na fibra em relação ao seu comprimento, e conseqüentemente haverá maior Nsp/mm.

Tabela 3. Correlação entre o Índice *slip planes* (Isp), ângulo dos *slip planes* (Asp), número de *slip planes* por milímetro (Nsp/mm), ângulo microfibrilar (AMF), densidade básica (DB), massa do fuste (MF) de *E. grandis* aos 28 anos.

	Asp	Nsp/mm	AMF	DB	MF
Isp	0,09	0,63	-0,15	0,41	0,59
Asp	-	0,23	-0,17	-0,28	0,08
Nsp/mm	-	-	-0,14	0,26	0,48

Em negrito as correlações de Pearson a 5% de significância que foram significativas,

A correlação entre o Isp com o Asp foi baixa estatisticamente. A massa do fuste não apresentou correlação com o Asp e nem com o Nsp/mm, contudo essas duas características mostram-se importantes quando utilizadas juntas para o cálculo do Isp, visto que a relação do Isp com a massa do fuste foi significativa.

A correlação foi baixa entre o Asp e o ângulo microfibrilar (TABELA 3), contudo existe a tendência do maior ângulo microfibrilar ocasionar o menor ângulo dos *slip planes*. A correlação entre esses dois ângulos torna-se importante para realizar a predição do ângulo da microfibrila com base nos Asp, visto que estes são mais fáceis de mensurar. Garland (1939) mencionou a existência de correlação direta entre os dois ângulos, embora Bienfait (1926) não encontrou essa correlação na madeira de *Pseudotsuga menziesii* (Douglas fir) e *Quercus alba* (white oak).

A densidade básica da madeira não correlacionou significativamente com nenhuma das características dos *slip planes* (TABELA 3). Visto que a densidade básica influencia positivamente na resistência mecânica da madeira e os *slip planes* causam o seu enfraquecimento, inversos efeitos são observados por estes dois fatores. Coté e Hanna (1983) fizeram referência sobre a existência da menor quantidade de *slip planes* em madeiras com maiores densidades devido a maior espessura da camada S2 da fibra e conseqüentemente maior resistência mecânica. Já Hoffmeyer et al, (1989) contradisseram isto, informando sobre a inexistência da relação entre os dois, Bienfait (1926) também não encontrou essa correlação na madeira de *Pseudotsuga menziesii* (Douglas fir) e *Quercus alba* (white oak).

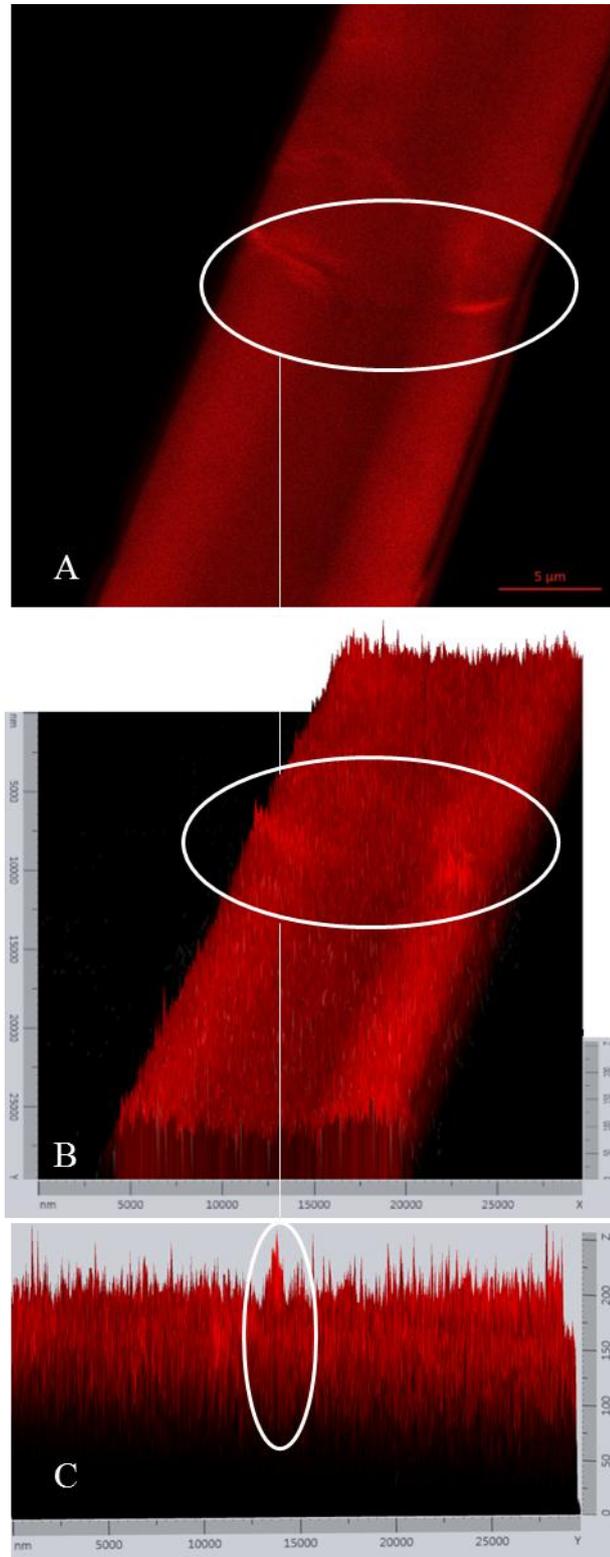
5.6. Perfil da fibra com *slip planes*

A estrutura física da fibra da madeira foi modificada quando o *slip plane* foi formado, originando uma elevação na superfície da fibra, assemelhando-se a região rompida da madeira

quando sujeita a esforços de compressão paralela às fibras, como pode ser observado na região circulada nas Figuras 13A e 13B.

Essa modificação na superfície da fibra caracteriza o *slip plane* como uma dobra ou vinco, que pode ser visualizada na imagem de perfil da fibra (região circulada na Figura 13C), em que o pico do *slip plane* caracteriza-se pela sua maior altura, sendo 75 nm acima da superfície da fibra próxima da região do *slip plane*.

Figura 13 – Microscopia confocal de uma fibra da madeira de *E. grandis* aos 28 anos apresentando um *slip plane* (100X).

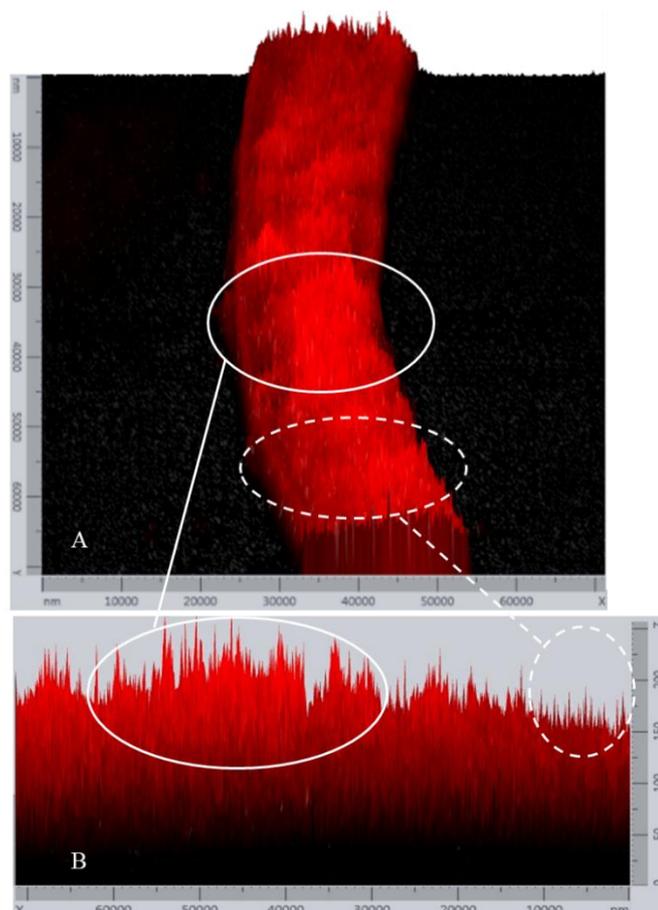


Legenda: A: fibra com presença de *slip plane*; B: dobra na parede da fibra chamada de *slip plane* (3D); C: perfil da fibra. As elipses nas figuras mostram o *slip plane*.
Fonte: Do autor (2017)

Na superfície da fibra são visualizadas irregularidades pontuais causados pelos *slip planes*. Nas Figuras 14A e 14B observa-se a região circulada em traços contínuos indicando a presença de vários *slip planes*, enquanto que na região circulada em traços descontínuos não há presença de *slip plane*.

Na imagem de perfil (FIGURA 14B) a diferença entre as duas regiões ocorre em função das alturas dos picos. As existências de picos com menor altura na região ausente de *slip planes* podem ser causadas pela rugosidade da superfície da fibra da madeira, que também foram constatadas por Österberg, Schmidt e Jääskeläinen (2006) ao utilizarem a microscopia confocal raman. Estes picos também podem ser provenientes de microfibrilas desprendidas do processo de maceração.

Figura 14 – Microscopia confocal de uma fibra da madeira de *E. grandis* aos 28 anos com vários *slip planes*.



Legenda: A: Fibra em 3D, B: Perfil da fibra. Área circulada com traço contínuo indica a presença de vários *slip planes*. Área circulada de com traço descontínuo indica a superfície da fibra sem a presença de *slip plane*.

Fonte: Do autor (2017)

6. CONCLUSÕES

Na metodologia da análise do Índice *slip planes* utilizou-se as variáveis relacionadas a morfologia da fibra e todas as características de distribuição dos *slip planes*, conseguindo mensurar o quanto os *slip planes* estão representados na fibra em relação ao seu comprimento.

A madeira apresentou grandes quantidades de *slip planes* ocasionados por esforços naturais. A massa do fuste da árvore influenciou significativamente no Índice *slip plane*, havendo redução no sentido da base para o topo da árvore.

No lenho comprimido a redução do Índice *slip planes* no sentido da base para o topo foi de 20,77 para 7,82% e no lenho tracionado de 17,62 para 6,70%. Essa tendência foi encontrada para o número de *slip plane* por milímetro apenas no lenho comprimido, variando de 69,23 para 29,48 *slip plane*/mm da base para o topo.

Os ângulos dos *slip planes* foram iguais nas posições do sentido da base para o topo, contudo no lenho comprimido houve o maior ângulo com 77,29°, enquanto no lenho tracionado foi de 76,14°.

Mediante observação em imagens 3D da microscopia confocal, a superfície da fibra foi alterada pela presença do *slip plane*, havendo aumento de 75 nm na região do *slip plane* em relação a superfície da fibra próxima da região do *slip plane*.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDER, P.; HILDÉN, L.; DANIELA, G. Cleavage of softwood kraft pulp fibres by hcl and celulasas. **BioResources**, v. 3, n. 2, p. 477-490, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 11941: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003, 6 p,
- BATCHELOR, W. L.; CONN, A. B.; PARKER, I. H. Measuring the fibril angle of fibres using confocal microscopy. **Appita Journal**, v. 50, n. 5, 1997.
- BALDUINO, A.P.C.; SOUZA, A.L.; MEIRA NETO, J.A.A.; SILVA, A.F.; SILVA JUNIOR, M.C. Fitossociologia e análise comparativa da composição florística do cerrado da flora de Paraopeba-MG. **Revista Árvore**, v.29, n.1, p. 25-34, 2005.
- BIECHELE, T.; NUTTO, L.; BECKER, G. Growth Strain in *Eucalyptus nitens* at Different Stages of Development. **Silva Fennica**, v. 43, n. 4, 2009.
- BIENFAIT, J. L. Relation of the manner of failure to the structure of wood under compression parallel to the grain. **Journal of Agricultural Research**, v. 33, n. 2, 1926.
- CAI, Y.; JESSOP, J. L. P. Effect of water concentration on photopolymerized acrylate/epoxide hybrid polymer coatings as demonstrated by Raman spec. **Polymer**, v. 50, p. 5406-5413, 2009.
- COTÉ, W, A.; HANNA, R, B. Ultrastructural characteristics of wood fracture surfaces. **Wood and Fiber Science**, v. 15, n. 2, p. 135-163, 1983.
- DINWOODIE, J. Induction of cell wall dislocations (*slip planes*) during the preparation of microscope sections of wood. **Nature**, v. 212, p. 525-527, 1966a.
- DINWOODIE, J. M. Growth stresses in timber - a review of literature, **Forestry**, v. 39, p. 162-170, 1966b.
- DINWOODIE, J. M. Failure in timber. Part 1: Microscopic changes in cell-wall structure associated with compression failure. **Journal of the Institute of Wood Science**, v. 4, n. 3, p. 37-53, 1968.
- DINWOODIE, J. M. Failure in Timber Part II: The Angle of Shear through the Cell Wall during Longitudinal Compression Stressing, **Wood Science and Technology**, v. 8, p. 56-67, 1974.
- DONALDSON, L.; RADOTIC, K.; KALAUZI, A.; DJIKANOVIC, D.; JEREMIC, M. Quantification of compression wood severity in tracheids of *Pinus radiata*. Don using confocal fluorescence imaging and spectral deconvolution. **Journal of Structural Biology**, v. 169, p. 106–115, 2010.
- ESAU, K. **Anatomia das plantas com sementes**. São Paulo: Edgard Blucher, 1974, 293p.

GARLAND, H. A microscopic study of coniferous wood in relation to its strength properties. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, v. 16, p. 1-75, 1939.

GRAY, J. D.; KOLESIK, P.; HÛJ, P. B.; COOMBE, B. G. Confocal measurement of the three-dimensional size and shape of parenchyma cells in a developing fruit tissue, **Plant Journal**, v. 19, p. 229-236, 1999,

HARTLER, N. Misaligned zones in cellulosic fibres. **Norsk Skogsind**, v. 4, p. 114-120, 1969.

HARTLER, N.; LÉMON, S. Misaligned zones in cellulosic fibres, Part II: Their formation during compression of the wood. **Norsk Skogsind**, v. 5, p. 151-158, 1969.

HEPLER, P. K.; GUNNING, B. E. Confocal Fluorescence Microscopy of Plant Cells. **Protoplasma**, v. 201, p. 121-157, 1998.

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

HOFFMEYER, P.; DAVIDSON, R. W. Mechano-sorptive creep mechanism of wood in compression and bending. **Wood Sci, Technol**, v. 23, p. 215–227, 1989.

KEITH, C. T.; CÔTÉ JÚNIOR, W. A. Microscopic characterization of slip lines and compression failures in wood cell walls. **For. Prod. Jnl**, v. 18, n. 3, p. 67-74, 1968.

KIBBLEWHITE, R. P. Effects of fiber kinking and pulp bleaching on wet web strength. **Tappi Journal**, v. 57, n. 8, p. 120-121, 1974.

KIBBLEWHITE, R. P.; BROOKES, D. Fibre, beating, and papermaking properties of kraft pulps from New Zealand Beech (*Nothofagus*) species. **N.Z. J. For. Sci.**, v. 7, n.3, p. 425-44, 1977.

KITIN, P.; FUNADA, R.; SANO, Y.; OHTANI, J. Analysis by Confocal Microscopy of the Structure of Cambium in the Hardwood *Kalopanax pictus*. **Annals of Botany**, v. 86, p. 1109-1117, 2000.

KITIN, P.; FUNADA, R.; SANO, Y.; BEECKMAN, H.; OHTANI, J. Variations in the lengths of fusiform cambial cells and vessel elements in *Kalopanax pictus*, **Annals of Botany**, v. 84, p. 621-632, 1999.

LIMA, J. T. **Clonal variation in the solid wood properties of Eucalyptus**, 1999, 276 p, Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira), University of Wales, Bangor.

LIMA, J. T.; BREESE, M. C.; CAHALAN, C. M. Variation in microfibril angle in Eucalyptus clones, **Holzforschung**, v, 58, p, 160-166, 2004,

LIMA, J. T.; PADILHA, C.; MOULIN, J. C.; GOULART, S. L. Ocorrência natural de “*slip planes*” na parede celular de fibras de madeira de *Eucalyptus* sp. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA, 2, 2015, Belo Horizonte, MG, Anais,, Belo Horizonte, 2015.

MAUKO, A.; MUCK, T.; MIRTIC, B.; MLADENOVIC, A.; KREFT, M. Use of confocal laser scanning microscopy (CLSM) for the characterization of porosity in marble. **Materials Characterization**, v. 60, p. 603-609, 2009.

MORTENSEN, U. A.; MADSEN, B. Protocol for Quantification of Defects in Natural Fibres for Composites. **Journal of Textiles**, 9 p., 2014.

NYHOLM, K.; ANDER, P.; BARDAGE, S.; DANIEL, G. Dislocations in pulp fibres – Their origin, characteristics and importance – A review. **Nordic Pulp Paper Res. J**, v. 16, p. 376-384, 2001.

PADDOCK, S. W. Principles and practices of laser scanning confocal microscopy. **Molecular Biotechnology**, v. 16, p. 127-149, 2000.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**, 4 ed, New York: 1980, 722p.

PYNAERT, R.; BUGUET, J.; CROUTXÉ-BARGHORN, C.; MOIREAU, P.; ALLONAS, X. Effect of reactive oxygen species on the kinetics of free radical photopolymerization. **Polym. Chem**, v. 4, p. 2475-2479, 2013.

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

TERZIEV, N.; DANIEL, G.; MARKLUND, A. Effect of abnormal fibres on the mechanical properties of paper made from Norway spruce, *Picea abies* (L.) Karst. **Holzforschung**, v. 62, p. 149-153, 2008.

THYGESEN, L. G.; HOFFMEYER, P. Image analysis for the quantification of dislocations in hemp fibres. **Industrial Crops and Products**, v. 21, p. 173-184, 2005.

THYGESEN, L. G.; BILDE-SØRENSEN, J. B.; HOFFMEYER, P. Visualisation of dislocations in hemp fibres: A comparison between scanning electron microscopy (SEM) and polarized light microscopy (PLM). **Industrial Crops and Products**, v. 24, p. 181–185, 2006.

THYGESEN, L. G. Quantification of dislocations in hemp fibers using acid hydrolysis and fiber segment length distributions. **J Mater Sci**, v. 43, p. 1311-1317, 2008.

THYGESEN, L. G.; THYBRING, E. E.; JOHANSEN, K. S.; FELBY, C. The mechanisms of plant cell wall deconstruction during enzymatic hydrolysis. **PLOS ONE**, v. 9, n. 9, 2014.

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

APÊNDICE

Apêndice 1. Análise de variância do Índice *slip planes* (I_{SP}), ângulo dos *slip planes* (A_{SP}) e do número de *slip plane* por milímetro (N_{SP}/mm).

Fator de variação	I_{SP}				
	GL	SQ	QM	F	P
Lenhos da base-topo (BT)	4	9640,9	2410,22	33,58	0,00
Lenhos sob tensões de compressão e tração (LCT)	1	8,36	8,36	0,11	0,73
BT*LCT	4	557,85	139,46	1,94	0,10
Resíduo	590	42348,98	71,77		
Total	599	52556,1			
CV (%)	59,30	Nº Observações	600	Média geral	14,28
A_{SP}					
	GL	SQ	QM	F	P
Lenhos da base-topo (BT)	4	93,55	23,38	2,67	0,03
Lenhos sob tensões de compressão e tração (LCT)	1	196,47	196,47	22,46	0,00
BT*MC	4	44,17	11,04	1,26	0,28
Resíduo	590	5161,48	8,74		
Total	599	5495,67			
CV (%)		Nº Observações	600	Média geral	
N_{SP}/mm					
	GL	SQ	QM	F	P
Lenhos da base-topo (BT)	4	65369,81	16342,45	9,45	0,00
Lenhos sob tensões de compressão e tração (LCT)	1	2001,64	2001,64	1,16	0,28
BT*MC	4	10713,35	2678,34	1,55	0,18
Resíduo	590	1020046,65	1728,89		
Total	599	1098131,46			
CV (%)	85,93	Nº Observações	600	Média geral	48,38

Apêndice 2. Regressão do Índice *slip planes* no sentido base-topo para os lenhos comprimido e tracionado.

Fontes de variação	GL	SQ	QM
Regressão	1	5215,3658	5215,3658
Erro	298	20486,9813	68,7483
Total	299	25702,3471	---
F (regressão) =	75,8618	p < 0,0001	
Variável dependente =	Coluna 2		

Variável independente =	Coluna 1		
Média (X) =	50		
Média (Y) =	14,4062		
Coef, de Determinação (R2) =	0,2029		
R2 (ajustado) =	0,2002		
Coeficiente de Correlação =	0,4505		
Intercepto (a) =	20,3027	t = 24,4863	p < 0,0001
Coef, de Regressão (b) =	-0,1179	t = -8,7099	p < 0,0001
IC 95% (a)	18,678 a 21,928		
IC 95% (b)	-0,144 a -0,091		
Equação	Y' = a + bX		

Apêndice 3. Regressão do Índice *slip planes* no sentido base-topo para os lenhos comprimido e tracionado.

Fontes de variação	GL	SQ	QM
Regressão	1	3224,338	3224,338
Erro	298	23621,06	79,2653
Total	299	26845,39	---
F (regressão) =	40,6778	p < 0,0001	
Variável dependente =	Coluna 2		
Variável independente =	Coluna 1		
Média (X) =	50		
Média (Y) =	14,1701		
Coef, de Determinação (R2) =	0,1201		
R2 (ajustado) =	0,1172		
Coeficiente de Correlação =	0,3466		
Intercepto (a) =	18,8064	t = 21,1235	p < 0,0001
Coef, de Regressão (b) =	-0,0927	t = -6,3779	p < 0,0001
IC 95% (a)	17,061 a 20,551		
IC 95% (b)	-0,121 a -0,064		
Equação	Y' = a + bX		

Apêndice 4. Correlação de Pearson a 5% de significância entre a massa do fuste e do Índice *slip planes*.

n (pares) =	15
r (Pearson) =	0,5933
IC 95% =	0,12 a 0,85
IC 99% =	-0,06 a 0,89
R2 =	0,3521
t =	2,6578
GL =	13

(p) =	0,0197
Poder 0,05 =	0,7643
Poder 0,01 =	0,5157

Apêndice 5. Regressão do número de *slip plane* por milímetro para os lenhos comprimidos e tracionados.

Fontes de variação	GL	SQ	QM
Regressão	1	55288,3606	55288,361
Erro	298	259717,888	871,5365
Total	299	315006,249	---
F (regressão) =	63,4378	p < 0,0001	
Variável dependente =	Coluna 2		
Variável independente =	Coluna 1		
Média (X) =	50		
Média (Y) =	50,2156		
Coef, de Determinação (R2) =	0,1755		
R2 (ajustado) =	0,1727		
Coeficiente de Correlação =	0,4189		
Intercepto (a) =	69,4142	t = 23,5129	p < 0,0001
Coef, de Regressão (b) =	-0,384	t = -7,9648	p < 0,0001
IC 95% (a)	63,628 a 75,200		
IC 95% (b)	-0,478 a -0,289		
Equação	$Y' = a + bX$		

Apêndice 6. Regressão do número de *slip plane* por milímetro no sentido base-topo para os lenhos comprimido de tracionado.

Fontes de variação	GL	SQ	QM
Regressão	1	12089,24	12089,24
Erro	298	769034,3	2580,652
Total	299	781123,6	---
F (regressão) =	4,6846	p = 0,0293	
Variável dependente =	Coluna 2		
Variável independente =	Coluna 1		
Média (X) =	50		
Média (Y) =	46,5626		
Coef, de Determinação (R2) =	0,0155		
R2 (ajustado) =	0,0122		
Coeficiente de Correlação =	0,1244		
Intercepto (a) =	55,54	t = 10,9331	p < 0,0001
Coef, de Regressão (b) =	-0,1795	t = -2,1644	p = 0,0323
IC 95% (a)	45,583 a 65,497		

IC 95% (b)	-0,342 a -0,017		
Equação	$Y' = a + bX$		

Apêndice 7. Teste estatístico da correlação de Pearson entre Índice *slip planes*, ângulo dos *slip planes*, número de *slip planes* por milímetro, densidade básica e massa do fuste.

	I_{SP}- ASP	I_{SP} -N/mm	ASP - N_{SP}/mm	I_{SP} -DB	I_{SP} -MF	ASP -DB
n (pares) =	600	600	600	15	15	15
r (Pearson) =	-0,09	0,6387	-0,2332	0,4169	0,5933	0,2805
IC 95% =	-0,17 a -0,01	0,59 a 0,68	-0,31 a -0,16	-0,12 a 0,77	0,12 a 0,85	-0,27 a 0,69
IC 99% =	-0,19 a 0,02	0,57 a 0,70	-0,33 a -0,13	-0,29 a 0,83	-0,06 a 0,89	-0,43 a 0,78
R ² =	0,0081	0,408	0,0544	0,1738	0,3521	0,0787
t =	-2,2096	20,3001	-5,864	1,6536	2,6578	1,0537
GL =	598	598	598	13	13	13
(p) =	0,0289	< 0,0001	< 0,0001	0,1221	0,0197	0,3112
Poder 0,05 =	0,7122	1	1	0,4573	0,7643	0,2588
Poder 0,01 =	0,4517	1	0,9997	0,2149	0,5157	0,0883

	ASP-MF	N_{SP} /mm-DB	N_{SP}/mm-MF	I_{SP}-AMF	ASP -AMF	N_{SP} /mm-AMF
n (pares) =	15	15	15	600	600	600
r (Pearson) =	-0,0804	0,2659	0,4886	-0,1532	0,1723	-0,1418
IC 95% =	-0,57 a 0,45	-0,29 a 0,68	-0,03 a 0,80	-0,23 a -0,07	0,09 a 0,25	-0,22 a -0,06
IC 99% =	-0,68 a 0,58	-0,44 a 0,77	-0,21 a 0,86	-0,25 a -0,05	0,07 a 0,27	-0,24 a -0,04
R ² =	0,0065	0,0707	0,2387	0,0235	0,0297	0,0201
t =	-0,291	0,9947	2,0191	-3,792	4,2763	-3,5028
GL =	13	13	13	598	598	598
(p) =	0,7757	0,338	0,0645	0,0002	< 0,0001	0,0006
Poder 0,05 =	0,0815	0,2414	0,5814	0,9834	0,9954	0,9673
Poder 0,01 =	0,023	0,0787	0,3172	0,9262	0,9729	0,8774

Correlações de Pearson a 5% de significância, I_{SP}: índice *slip plane*; ASP: ângulo do *slip plane*; N_{SP}/mm: número de *slip plane* por milímetro; DB: densidade básica; MF: massa do fuste.