



**RAPHAEL NOGUEIRA REZENDE**

**FLUXO DE AR E ÁGUA NAS MADEIRAS DE**  
*Eucalyptus grandis* E DE *Eucalyptus dunnii*

**LAVRAS - MG**

**2014**

**RAPHAEL NOGUEIRA REZENDE**

**FLUXO DE AR E ÁGUA NAS MADEIRAS DE *Eucalyptus grandis* E DE  
*Eucalyptus dunnii***

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 em Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Ph.D. José Tarcísio Lima

**LAVRAS - MG**

**2014**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e  
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Rezende, Raphael Nogueira.

Fluxo de ar e água nas madeiras de *Eucalyptus grandis* e de  
*Eucalyptus dunnii* / Raphael Nogueira Rezende. – Lavras : UFLA,  
2014.

98 p.: il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: José Tarcísio Lima.

Bibliografia.

1. Permeabilidade. 2. Taxa de secagem. 3. Defeitos. 4. Pré-  
tratamentos. 5. Eucalipto. I. Universidade Federal de Lavras. II.  
Título.

CDD – 674.38

**RAPHAEL NOGUEIRA REZENDE**

**FLUXO DE AR E ÁGUA NAS MADEIRAS DE *Eucalyptus grandis* E DE  
*Eucalyptus dunnii***

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 em Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 30 de julho de 2014.

Dra. Angélica de Cássia Oliveira Carneiro	UFV
Dr. Elio José Santini	UFSM
Dr. José Reinaldo Moreira da Silva	UFLA
Ph.D. Paulo Ricardo Gherardi Hein	UFLA

Ph.D. José Tarcísio Lima  
Orientador

**LAVRAS - MG**

**2014**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, primeiramente, pela vida.

À minha família, em especial à Luana, pai, mãe, Juninho, sogros, sobrinhos e cunhados, pelo incentivo, amor, apoio e convivência.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos e à FAPEMIG e ao CNPq, pela parceria nos trabalhos.

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, pela oportunidade concedida.

Ao professor Tarcísio, pela orientação e ensinamentos, que muito contribuíram para meu aprendizado e para a realização deste trabalho.

Aos professores da Ciência e Tecnologia da Madeira/UFLA, coorientadores, técnico-administrativos, colegas e demais que auxiliaram no desenvolvimento desta pesquisa e na minha formação.

## RESUMO

O presente trabalho foi realizado com os objetivos de avaliar o fluxo de ar e de água nas madeiras de *Eucalyptus grandis* e de *Eucalyptus dunnii* e suas propriedades físicas, anatômicas e químicas, e verificar a influência dos pré-tratamentos de acondicionamento à baixa temperatura (0 °C), congelamento (-20 °C) e imersão em água quente (85 °C) na permeabilidade, na taxa de secagem e nos defeitos de secagem da madeira. Para isso, foram utilizadas quatro árvores provenientes de plantio experimental da Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil, com 37 anos de idade. As árvores foram abatidas e seccionadas em toras, sendo estas desdobradas para a obtenção do pranchão. Cada pranchão foi aplainado e cortado, obtendo-se corpos de prova cilíndricos, para a determinação da permeabilidade ao ar e à água destilada, com 5,0 cm de altura e 2,0 cm de diâmetro, e corpos de prova com 10,0 x 5,0 x 1,0 cm, para a secagem a 100 °C, em estufa elétrica de laboratório. Os corpos de prova foram submetidos aos pré-tratamentos de imersão em água quente a 85 °C, de acondicionamento a 0 °C e de congelamento a -20 °C, durante 12 e 24 horas. Os resultados indicaram que as permeabilidades longitudinais ao ar e à água da madeira de *E. grandis* foram, em média, 5% e 10% superiores às de *E. dunnii* e que ambas as madeiras não apresentaram fluxo nos ensaios de permeabilidade transversal às fibras. A madeira de *E. grandis* apresentou menores valores de densidade básica, teor de extrativos e comprimento de fibras e maiores diâmetros de vasos e de pontoações que a de *E. dunnii*. As maiores taxas de secagem foram obtidas para a madeira de *E. grandis*, em média 10% superiores para a saída de água livre e total e 5% para a saída de água de adesão em relação ao *E. dunnii*. A madeira de *E. grandis* apresentou menores índices de defeitos que a de *E. dunnii*, em torno de 40% inferior para o encurvamento, 30% inferior para arqueamento, 70% inferior para rachaduras e 5% inferior para intensidade do colapso. Os pré-tratamentos de acondicionamento a 0 °C e de congelamento a -20 °C não tiveram efeitos significativos nas permeabilidades ao ar e à água das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii*. O pré-tratamento de imersão em água quente promoveu os maiores aumentos na permeabilidade ao ar e à água das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii*, em média 20% e 10%, respectivamente, para o *E. grandis* e de 15% e 9% para o *E. dunnii*. As taxas de secagem da madeira de *E. grandis* aumentaram, em média, 55% com a imersão em água quente, enquanto para o *E. dunnii* o acréscimo foi de 50%. Os menores incrementos nas taxas de secagem ocorreram para a madeira acondicionada a baixas temperaturas, em média de 10%. O congelamento promoveu aumentos intermediários na taxa de secagem entre os pré-tratamentos avaliados, com médias de 25% na madeira de *E. grandis* e de 20% na de *E. dunnii*, enquanto os índices de rachaduras foram os maiores, em média, 35% superiores para ambas.

O pré-tratamento de imersão em água quente por 24 horas foi responsável pela maior redução dos defeitos de secagem, com destaque para os índices de rachaduras e de colapso das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii*, em média de 65% e 15%, respectivamente. De forma geral, a madeira de *E. grandis* foi mais permeável que a de *E. dunnii* e apresentou as maiores taxas de secagem e menores índices de defeitos.

Palavras-chave: Permeabilidade. Taxa de secagem. Defeitos. *Eucalyptus grandis*. *E. dunnii*.

## ABSTRACT

This work was carried out with the objective to assess the flow of both air and water in *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus dunnii* wood, as well as the physical, anatomical and chemical properties and to verify the influence of pretreatment conditioning at low temperature (0 °C), freezing (-20 °C) and immersion in hot water (85 °C) in permeability, drying rates and defects. For this, four trees from experimental plantation of the Federal University of Lavras, Lavras, MG, Brazil, with 37 years old, were used. The trees were cut and logs were sawn to produce the plank. Each plank was machined to produce cylindrical specimens for determining the permeability to the both air and distilled water, with 5.0 cm height and 2.0 cm in diameter, specimens with 10.0 x 5.0 x 1.0 cm for drying at 100 °C in laboratory oven. The specimens were submitted to immersion in hot water at 85 °C, conditioning at 0 °C and freezing at -20 °C, during 12 and 24 hours. The results indicated that the longitudinal permeabilities to the air and water of *E. grandis* wood were, on average, 5% and 10% higher than in *E. dunnii* and both the wood showed no flow in test of transversal to the fibers permeability. The *E. grandis* wood showed lowest values of basic density, extractives content and fiber length and highest diameter of vessels and pits than in *E. dunnii*. The highest drying rates were obtained for *E. grandis* wood, on average 10% higher for the output of both free water and total and 5% for the output of adhesion water, in relation to *E. dunnii*. The *E. grandis* wood showed lower defect rates than the *E. dunnii*, around 40% lower for bowing, 30% lower for crooking, 70% lower for cracking and 5% lower for intensity collapse. Pretreatments of conditioning at 0 °C and freezing at -20 °C had no significant effects on the permeability to air and water for the woods of *E. grandis* and *E. dunnii*. Pretreatment of immersion in hot water promoted the greatest increase in permeability to air and water in *E. grandis* and *E. dunnii* woods, on average 20% and 10% respectively, for *E. grandis* and 15% and 9% for *E. dunnii*. The drying rates of *E. grandis* wood increased, on average, 55% with hot water immersion, while for *E. dunnii* the increase was 50%. Smaller increments in the rate of drying occurred for wood conditioned at low temperatures, on average of 10%. The freezing promoted increases intermediates in the drying rate among the pretreatments evaluated, with average increases of 25% in the wood of *E. grandis* exposed and 20% in the wood of *E. dunnii*, while the indices of cracks were the largest, on average, 35% higher for both. Pretreatment of immersion in hot water for 24 hours was responsible for the largest reduction in the drying defects, especially the indices of cracks and

collapse of *E. grandis* and *E. dunnii* woods, on average, 65% and 15%, respectively. In general, the *E. grandis* wood was more permeable than *E. dunnii* and showed the highest drying rates and lower defect rates.

Keywords: Permeability. Drying rate. Deffects. *Eucalyptus grandis*. *Eucalyptus dunnii*.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1	O gênero <i>Eucalyptus</i> .....	12
2.2	Movimentação de água na madeira.....	13
2.3	Fluxo e permeabilidade da madeira.....	16
2.4	Fatores que afetam o fluxo e a permeabilidade.....	22
2.5	Secagem da madeira de <i>Eucalyptus</i> .....	25
2.6	Defeitos de secagem.....	27
2.7	Pré-tratamentos de secagem.....	30
2.7.1	Imersão em água quente.....	33
2.7.2	Acondicionamento a baixas temperaturas e congelamento.....	37
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	41
3.1	Obtenção e processamento do material.....	41
3.2	Preparo e confecção de corpos de prova.....	41
3.3	Determinação da permeabilidade da madeira.....	45
3.4	Secagem da madeira e avaliação dos defeitos de secagem.....	48
3.5	Caracterização anatômica da madeira.....	50
3.6	Análise química da madeira.....	53
3.7	Aplicação de pré-tratamentos.....	54
3.8	Análise estatística.....	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
4.1	Propriedades das madeiras de <i>Eucalyptus grandis</i> e de <i>E. dunnii</i> .....	57
4.1.1	Propriedades químicas da madeira.....	58
4.1.2	Caracteres anatômicos.....	60
4.1.3	Propriedades físicas.....	65
4.2	Taxa de secagem e defeitos de secagem.....	67
4.3	Efeitos dos pré-tratamentos na permeabilidade da madeira.....	70
4.4	Efeitos dos pré-tratamentos na taxa e defeitos de secagem da madeira.....	75
5	CONCLUSÃO.....	80
	REFERÊNCIAS.....	82

## 1 INTRODUÇÃO

Culturas do gênero *Eucalyptus* se destacam no Brasil por apresentarem boa adaptação às condições edafoclimáticas, rápido crescimento, alta produtividade, ciclos de menor rotação, tecnologia avançada de produção de mudas e desenvolvimento de práticas silviculturais eficientes e de técnicas que permitem melhor aproveitamento de sua madeira.

Diversos fatores, aliados à maior oferta em relação à das espécies nativas, fizeram com que muitas empresas se interessassem pelo uso da madeira de *Eucalyptus*, atualmente consolidado no setor de construção civil, além da produção de polpa celulósica e papel, lenha, carvão vegetal, painéis reconstituídos, revestimentos e móveis. Por outro lado, juntamente com o crescente consumo dos últimos anos, dificuldades no processamento primário vêm sendo constatadas, principalmente durante a secagem da madeira.

Madeiras do gênero *Eucalyptus* são consideradas de secagem difícil e complexa, devido à baixa permeabilidade que, aliada à manifestação de tensões de crescimento, contribuem para o aparecimento de rachaduras, empenamentos diversos e colapso durante a secagem. Diante disso, a secagem da madeira de *Eucalyptus* deve ser conduzida de forma criteriosa, por meio da adoção de programas de secagem a baixas temperaturas ou “suaves”, ou com a aplicação de pré-tratamentos que possibilitam minimizar a incidência de defeitos e perdas em matéria-prima.

Programas de secagem “suaves” geralmente aumentam o tempo de secagem e os custos do processo. Já os pré-tratamentos, como congelamento, acondicionamento a baixas temperaturas e imersão da madeira em água quente, podem favorecer o fluxo de líquidos e de gases, a saída de água da madeira e amenizar contrações excessivas e defeitos.

A tecnologia desenvolvida para a maioria dos pré-tratamentos de secagem data das décadas de 1950 e 1960 e foi testada em escala laboratorial, demonstrando-se a possibilidade de aumentar a taxa de secagem e o fluxo de ar e de água na madeira e melhorar a qualidade da secagem. Entretanto, até mesmo nos dias atuais, a maior parte dos experimentos se limitou às madeiras asiáticas e norte-americanas.

Informações sobre o movimento de fluidos na madeira de *Eucalyptus* e a influência de pré-tratamentos sobre a permeabilidade e a secagem ainda são escassas na literatura, mesmo quando se trata de espécies muito utilizadas pelo setor florestal brasileiro, como o *E. grandis* e o *E. dunnii*.

Haja vista a grande demanda do mercado e as possibilidades de aplicação da madeira em diferentes processos do setor florestal brasileiro, é importante conhecer e aprimorar técnicas de secagem da madeira de *E. grandis* e de *E. dunnii* que resultem em melhor qualidade da madeira seca e relação custo/benefício do processo e maiores taxas de secagem. Assim, estudos tornam-se necessários e recomendáveis, de forma a fornecer subsídios para a condução da secagem convencional.

Neste contexto, este trabalho foi realizado com os seguintes objetivos:

- a) avaliar o fluxo de ar e de água nas madeiras de *Eucalyptus grandis* e de *Eucalyptus dunnii*, e suas propriedades físicas, químicas e anatômicas;
- b) verificar a influência dos pré-tratamentos à baixa temperatura (0 °C), congelamento (-20 °C) e imersão em água quente (85 °C) na permeabilidade ao ar e à água, na taxa de secagem e nos defeitos de secagem da madeira.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 O gênero *Eucalyptus*

O gênero *Eucalyptus* é nativo da Austrália e pertence à família Myrtaceae. Com cerca de 700 espécies catalogadas e um grande número de variedades e híbridos tem sido plantado no Brasil em grandes áreas, sendo amplamente empregado em diferentes processos produtivos. Sua madeira tem sido considerada uma das principais fontes de matéria-prima para abastecimento da indústria de base florestal do país, responsável por 70% da produção florestal (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2013; COPPEN, 2002; PRYOR, 1985).

A cultura do *Eucalyptus* tem se destacado no Brasil devido à boa adaptação às condições edafoclimáticas, ao rápido crescimento, à tecnologia avançada de produção de mudas, ao desenvolvimento de práticas silviculturais eficientes, ao melhoramento genético e às técnicas que permitem um melhor aproveitamento de sua madeira.

Apesar da grande quantidade de espécies descritas, os plantios no Brasil se restringem a híbridos e a um número limitado de espécies, como, por exemplo, *Eucalyptus urophylla*, *E. saligna*, *E. camaldulensis*, *E. dunnii* e *E. grandis*. De acordo com a ABRAF (2013), a área plantada com o gênero *Eucalyptus*, em 2013, alcançou 5,10 milhões de hectares e suas madeiras são empregadas com diferentes fins (celulose, painéis, carvão vegetal, madeira para construção civil, etc.), sendo mais de 15% destinados à produção de serrados.

O *Eucalyptus grandis* é uma das espécies mais plantadas no país e apresenta grande potencial produtivo e tecnológico, sendo sua madeira empregada nos segmentos de celulose e papel, painéis de fibra e aglomerados,

lenha, móveis e serraria (ABRAF, 2013; LOPES et al., 2011; SOARES et al., 2003; SOUZA et al., 2004).

Já a utilização do *Eucalyptus dunnii* vem sendo considerada uma alternativa silvicultural para empresas das regiões sul e sudeste do Brasil. Esta cultura destaca-se pelo rápido crescimento, uniformidade nos talhões e forma das árvores, além de tolerância a geadas (CALORI; KITUTI, 1997; STAHL, 2010). Dentre suas aplicações, pode-se destacar a produção de polpa celulósica, madeira serrada com fins estruturais, aglomerados, assoalhos e carrocerias (CALORI; KITUTI, 1997; FLORSHEIM et al., 2009).

## **2.2 Movimentação de água na madeira**

O processo de secagem da madeira está diretamente relacionado com a movimentação de água na madeira.

O movimento de água ocorre em qualquer direção, tanto no sentido longitudinal como no transversal, das zonas de maior umidade para zonas de menor umidade. A condição fundamental para que haja tal movimentação é a existência de gradientes de umidade. Outros fatores inerentes à própria madeira são estrutura anatômica, composição química, massa específica, proporção cerne/alburno, umidade inicial, dimensões das peças e permeabilidade. Além desses, a movimentação é influenciada por variáveis inerentes ao ambiente de secagem, como temperatura, umidade relativa e velocidade de circulação de ar (SIAU, 1984; SKAAR, 1972).

De acordo com Siau (1971), o movimento de fluidos na madeira pode ser dividido em duas classificações: capilaridade, conhecida também como fluxo de massa sob influência de gradiente de pressão capilar, e difusão.

A água livre ocupa espaços, cavidades celulares, vasos e canais e é mantida por fracas ligações capilares, movimentando-se de forma relativamente

simples de ser compreendida quanto a aspectos físicos e matemáticos. No estado líquido, ela se movimenta por capilaridade, por meio de diferenças de tensão ou pressão existentes dentro do capilar, sendo forças de atração entre as moléculas do próprio líquido responsáveis por esta capilaridade e a permeabilidade da madeira influencia fortemente este fluxo (BRAMHALL, 1976; LIU et al., 2001; SKAAR, 1972).

Kollmann e Coté (1968) e Perré e Badel (2006) afirmam que o fluxo de água livre em um capilar é explicado pelas leis de Poiseuille e de Laplace. A ascensão de um líquido em um capilar é induzida pela curvatura do menisco na interface líquido-gás. Considerando-se um menisco balanceado (côncavo) e outro não balanceado (plano), a pressão sobre o primeiro é menor, havendo, assim, um movimento ascendente em função do gradiente de pressão gerado pela evaporação da água na superfície e condensação na inferior (Figura 1).

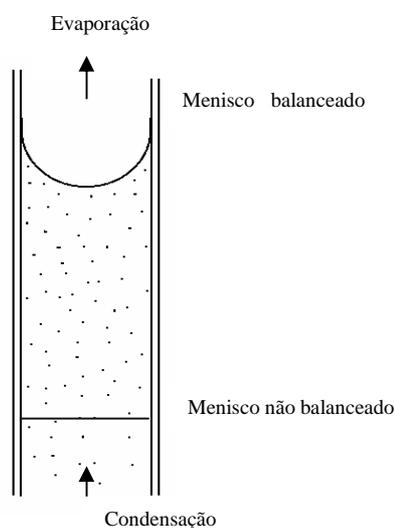


Figura 1 Fluxo de água livre em um capilar  
Fonte: Kollmann e Coté (1968)

Em termos matemáticos, uma tensão capilar “T”, ou diferença de pressão “ $\Delta P$ ” dentro de um capilar com raio do menisco “r”, pode ser determinada por meio da Equação 1.

$$T = \Delta P = 2\sigma/r \quad (1)$$

em que

T = tensão capilar ( $\text{g.cm}^{-2}$ );

$\Delta P$  = diferença de pressão;

$\sigma$  = tensão superficial do líquido ( $\text{g.cm}^{-1}$ );

r = raio do menisco no capilar (cm).

A tensão capilar é inversamente proporcional ao raio “r” de curvatura do menisco. Considera-se que quanto maior o raio do menisco, maior é a resistência ao deslocamento da coluna de água e, em consequência, disso, menor é a tensão capilar, o que resulta em um menor fluxo ascendente (SIAU, 1984). Perré e Badel (2006) citam que, em um capilar com raio do menisco igual a 1 mm, a diferença de pressão é de 0,146 kPa, equivalente a uma altura de coluna de água de 14,9 mm. Já para um capilar com raio do menisco 10 vezes menor (0,1 mm), a diferença é de 1,46 kPa, equivalente a 149 mm.

Já o fenômeno de difusão de água na madeira ocorre abaixo do ponto de saturação das fibras e envolve a movimentação de água de adesão e de vapor d'água. A água de adesão está ligada à parede celular por meio de ligações de hidrogênio e move-se através das paredes em função de um gradiente de umidade. O movimento de vapor d'água se dá nas cavidades celulares, pontuações e placas de perfuração, devido a um gradiente de pressão de vapor (SKAAR, 1972).

De acordo com Hart (1966), a água de adesão evapora devido a um gradiente de umidade, atravessa as cavidades celulares por meio de um gradiente de pressão de vapor e condensa-se para atravessar a parede, até o momento em que atinge a superfície da madeira.

Siau (1971) afirma que a difusão é um processo mais lento e complexo que a capilaridade. Na difusão, o fluxo de umidade é considerado variável no tempo e no espaço e sua explicação matemática se baseia na segunda Lei de Fick, que representa a velocidade de remoção de umidade em função do tempo para uma determinada distância (Equação 2).

$$\frac{dm}{dt} = Dg \frac{d^2M}{dx^2} \quad (2)$$

em que

$\frac{dm}{dt}$  = quantidade de umidade removida em uma unidade de tempo (t);

$Dg$  = coeficiente de difusão médio ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ );

$\frac{d^2M}{dx^2}$  = variação da umidade na distância (x)

### **2.3 Fluxo e permeabilidade da madeira**

De acordo com Siau (1971), o termo fluxo refere-se ao escoamento do fluido através de uma superfície em um determinado tempo. O movimento de fluidos na madeira abrange diferentes tipos de fluxo, que podem ser divididos em cinco categorias: viscoso ou laminar, transitório, turbulento, não linear e molecular.

Gama (2002) afirma que o fluxo viscoso é caracterizado por um movimento em forma de lâminas, regular e alinhado, com predominância de forças viscosas e fluxo de massa desprezível. O fluxo transitório é aquele com comportamento intermediário entre o escoamento laminar e o turbulento. O fluxo turbulento corresponde a um movimento aleatório das moléculas do fluido, com considerável fluxo de massa e forças viscosas desprezíveis. O fluxo não linear, muitas vezes confundido com o turbulento, ocorre devido à perda de energia cinética durante o movimento do fluido na entrada de capilares de pequenos diâmetros. Já o fluxo molecular também é conhecido por difusão de Knudsen, em que há difusão de moléculas, com sucessivas colisões moleculares na parede dos capilares devido a um baixo gradiente de pressão (GAMA, 2002; POKKI et al., 2010; SIAU, 1971).

Os diferentes tipos de fluxo geralmente são classificados em função de um número adimensional, conhecido como Número de Reynolds “Re”, conforme a Equação 3 (GAMA, 2002).

$$Re = \frac{2\rho Q}{\pi r \eta} = \frac{2rv\rho}{\eta} \quad (3)$$

em que

Re = nº de Reynolds;

$\rho$  = densidade do fluido ( $\text{g.cm}^{-3}$ );

Q = vazão do fluido ( $\text{cm}^3.\text{s}^{-1}$ );

r = raio do capilar (cm);

$\eta$  = viscosidade ( $\text{dyna.seg.cm}^{-2}$ );

v = velocidade média linear do fluido ( $\text{cm.seg}^{-1}$ ).

O fluxo laminar apresenta um número de Reynolds (Re) inferior a 2.000. Fluxos transitórios, turbulentos e não lineares apresentam, respectivamente,  $2.000 \leq Re \leq 4.000$ ,  $Re > 2.400$  e  $0,04 < Re < 16$ . Para o fluxo molecular, não há um “Re” especificado (GAMA, 2002).

Pokki et al. (2010) e Siau (1971) apontam que o conhecimento sobre os diferentes tipos de fluxo na madeira é importante quando um dos focos do estudo é a permeabilidade, sendo esta propriedade muitas vezes confundida com a porosidade.

Porosidade é definida como o volume ou percentual de espaços vazios em um sólido. Já a permeabilidade é uma propriedade física relacionada à facilidade com que fluidos são transportados através de um cubo unitário poroso com pressão diferencial unitária entre duas faces opostas, ou seja, a magnitude do fluxo na madeira é determinada por sua permeabilidade (SIAU, 1971).

Ainda segundo o mesmo autor, um sólido, para ser permeável, deve ser poroso, porém, a recíproca não é verdadeira. A permeabilidade somente existe se os espaços vazios são interconectados por aberturas, como as pontoações na madeira. Se estas estruturas estiverem obstruídas, incrustadas ou com depósitos de extrativos, a madeira assume uma estrutura de célula fechada e pode apresentar fluxo e permeabilidade muito baixos, afetando diferentes processos de utilização, como a impregnação de cavacos na polpação, o tratamento preservativo, a colagem, a absorção de água, os acabamentos em painéis de madeira e a taxa e/ou qualidade da secagem (LEHRINGER et al., 2009; TAGHIYARI et al., 2010; TARMIAN; PERRÉ, 2009).

O fluxo regular de fluidos na madeira obedece à Lei de Darcy que, geralmente, é dada pela Equação 4 (KOLLMANN et al., 1975; SIAU, 1984).

$$\text{Condutividade} = \frac{\text{Fluxo}}{\text{Gradiente}} \quad (4)$$

Na Lei de Darcy, essa condutividade é também chamada de permeabilidade e algumas suposições devem ser consideradas para a sua aplicação, como existência de fluxo viscoso e linear, proporcionalidade entre velocidade, vazão volumétrica e gradiente de pressão, homogeneidade de fluido, predominância de porosidade homogênea, não interação entre fluxo e substrato e independência da permeabilidade com o comprimento na direção do fluxo (COMSTOCK; COTÊ, 1968; SIAU, 1971). Embora essas suposições não sejam totalmente respeitadas quando aplicadas ao fluxo de gases e líquidos através da madeira, a equação básica de Darcy pode ser aplicada para relacionar a variação de fluxo e o gradiente de pressão na madeira, uma vez que outros métodos não atingiram resultados precisos para a propriedade (LEHRINGER et al., 2009; SIAU, 1984).

Teorias alternativas à Lei de Darcy para a explicação do fluxo na madeira e a obtenção da permeabilidade a partir da relação fluxo/gradiente já foram propostos, em sua maioria para fluidos líquidos. Porém, mesmo adotando-se um regime de fluxo diferente ao considerado na Lei de Darcy, Spolek e Piroozmandi (1989) constataram que o método testado pode não prever fielmente a permeabilidade absoluta da madeira devido à dificuldade de obtenção de condições de umidade uniformes e incertezas da tecnologia de ajuste de equações para a obtenção da propriedade.

As principais variáveis da Lei de Darcy estão representadas na Figura 2.

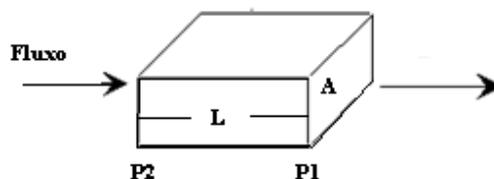


Figura 2 Variáveis componentes da Lei de Darcy  
Fonte: Siau (1984)

A Lei de Darcy aplicada a fluidos líquidos, como água e soluções preservativas, está representada na Equação 5 (SIAU, 1984).

$$K_p = \frac{\text{fluxo}}{\text{gradiente } \Delta P/L} = \frac{Q/A}{A \times \Delta P} = \frac{V \times L}{t \times A \times \Delta P} \quad (5)$$

em que

$K_p$  = permeabilidade;  $\text{cm}^3$  (líquido). $\text{cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

$Q$  = vazão,  $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;

$A$  = área da seção perpendicular à direção do fluxo,  $\text{cm}^2$ ;

$\Delta P$  = diferencial de pressão entre inicial e final, atm;

$L$  = comprimento na direção do fluxo, cm;

$V$  = volume do líquido escoado,  $\text{cm}^3$ ;

$t$  = tempo de escoamento do líquido, s.

Para fluidos gasosos, como o ar atmosférico, quando se aplica a Lei de Darcy, deve ser considerada a expansão dos gases que ocorre enquanto ele se movimenta, a qual ocasiona contínuas alterações no gradiente de pressão e na vazão ( $Q$ ). Levando-se em conta estes aspectos, a lei pode ser expressa pela Equação 6 (SIAU, 1984).

$$K_g = \frac{V \times L \times P}{t \times A \times \Delta P \times P} = \frac{Q \times L \times P}{A \times \Delta P \times P} \quad (6)$$

em que

$K_g$  = permeabilidade;  $\text{cm}^3$  (gás). $\text{cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

$V$  = volume do fluido gasoso percorrido na amostra,  $\text{cm}^3$ ;

$L$  = comprimento na direção do fluxo, cm;

$P$  = pressão do local no qual o fluxo é medido, atm;

$t$  = tempo, s;

$A$  = área da seção perpendicular à direção do fluxo,  $\text{cm}^2$ ;

$\Delta P$  = diferencial de pressão, atm;

$\bar{P}$  = média aritmética entre pressão inicial e final, atm;

$Q$  = vazão,  $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Siau (1984) ressalta que a medição de permeabilidade gasosa é muito mais simples que a permeabilidade a líquidos. Para fluidos gasosos, os problemas associados com as forças capilares são eliminados, não há o efeito da tensão do líquido e a modificação da estrutura da madeira e os valores de viscosidade são inferiores (HANSMANN et al., 2002; POKKI et al., 2010). No entanto, as medidas do fluxo gasoso podem ser prejudicadas por partículas em suspensão e vapor d'água no fluido (SIAU, 1971).

A permeabilidade a líquidos foi inicialmente determinada em 1963, por Kenso e colaboradores (SIAU, 1984). O aparato elaborado para a mensuração da permeabilidade líquida serve até hoje como base para o desenvolvimento de instrumentos mais sofisticados. O equipamento deve conter basicamente manômetros reguladores de pressão, reservatório de vácuo, compartimento porta-amostra, bureta para comportar o fluido líquido, mangueiras, rolas e juntas cônicas interligadas.

Já a permeabilidade a gases teve sua primeira determinação registrada em 1969, por Pety e Preston (SIAU, 1984). O equipamento utilizado para mensuração é semelhante ao de permeabilidade a líquidos, utilizando-se, em substituição à bureta, rotâmetros medidores de fluxo, ou seja, de vazão do fluido.

Ressalta-se que um dos grandes problemas atuais para a determinação da permeabilidade é a ausência de normas padronizadas, além do fato de que cada

estudo adota regimes de fluxo e unidades diferentes para a propriedade em questão (BRADIC et al., 2007).

#### **2.4 Fatores que afetam o fluxo e a permeabilidade**

A permeabilidade da madeira está diretamente ligada ao fluxo de um determinado fluido em sua estrutura e varia de acordo com uma série de fatores, como características químicas e anatômicas, direção de fluxo, porosidade, comprimento percorrido pelo fluido e tipo de fluido, entre outros (KAMKE; LEE, 2007; SIAU, 1971).

Lepage et al. (1986) e Panshin e De Zeeuw (1980) afirmam que os principais meios para a propagação de um fluido em madeiras de folhosas são os vasos, estruturas tubulares alinhadas longitudinalmente que se comunicam por meio de placas de perfuração e de pontoações. Segundo estes autores, quando os vasos têm placas de perfuração simples, a circulação de líquidos é favorecida, já que as aberturas são maiores e comportam-se como um caminho sem obstáculos.

O diâmetro dos vasos, sua frequência e distribuição, o tipo de pontoação, o número e o diâmetro também afetam a permeabilidade, principalmente quando este é superior a 10  $\mu\text{m}$  e há grande possibilidade de formação de tilos, que são expansões de células parenquimáticas adjacentes, devido a diferenças de pressão que obstruem os vasos. Além disso, a deposição de substâncias incrustantes no vaso pode causar sua oclusão parcial ou total e, conseqüentemente, reduzir a permeabilidade da madeira, sendo uma barreira ao fluxo, principalmente no cerne (ALZATE, 2004; COMSTOCK, 1970; LEPAEGE et al., 1986; LEHRINGER et al., 2009).

No cerne e no alburno, o fluxo e a permeabilidade também são variáveis. Silva et al. (2010) observaram que o fluxo no cerne de *E. grandis* é cerca de 28 vezes inferior ao do alburno. De forma geral, o alburno tem atividade fisiológica

de condução, enquanto o cerne apresenta baixa ou nenhuma atividade condutora, uma vez que tem pontoações obstruídas, extrativos e substâncias insolúveis em compostos orgânicos depositados e pode apresentar tilos (BRADIC et al., 2007; GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

De forma geral, as características anatômicas que mais afetam o fluxo longitudinal em folhosas são o comprimento e o diâmetro de vasos, o diâmetro de pontoações intervasculares e o comprimento de fibras, enquanto, na direção radial, o comprimento e o diâmetro dos raios, a espessura de parede celular e o número de pontoações influenciam de forma mais pronunciada (AHMED; CHUN, 2011).

A composição química da madeira é outro fator importante para o fluxo e para a permeabilidade, principalmente quando apresenta alto teor de extrativos. Extrativos são considerados componentes químicos acidentais, não essenciais na estrutura da parede celular, de natureza orgânica, baixo peso molecular e solúveis em solventes orgânicos neutros ou água. Milota et al. (1995) afirmam que madeiras com elevado teor de extrativos são menos permeáveis do que madeiras com menor quantidade desses componentes, uma vez que obstruem o caminho do fluxo. Dentro da classe dos extrativos existem componentes higroscópicos que, por apresentarem afinidade com a água, alteram a dinâmica do fluxo e podem dificultar a passagem do fluido (WANGAARD; GRANADOS, 1967).

Em termos de direção de fluxo, Comstock (1970) e Pokki et al. (2010) afirmam que a permeabilidade da madeira é de grande variabilidade, e a relação permeabilidade longitudinal/transversal é muito elevada. Kininmonth (1971) obteve relação entre permeabilidade longitudinal e transversal variando de 50.000 a 1.000.000, para as espécies *Nothofagus fusca* e *Eucalyptus regnans*. A explicação para isso está na própria estrutura e orientação dos vasos, que

facilitam este fluxo longitudinal e têm papel fundamental na movimentação de líquidos (AHMED; CHUN, 2009).

Além dos fatores citados, Siau (1971) menciona que, considerando-se um regime de fluxo não permanente, o fluxo e a permeabilidade medida decrescem com o aumento do comprimento da amostra, com maior efeito em madeiras de baixa permeabilidade. A redução do fluxo está ligada à distância percorrida pelo fluido, com maior perda de energia nos capilares (BRAMHALL, 1976).

Não apenas fatores relacionados à madeira afetam o fluxo e a permeabilidade. Em função do tipo de fluido que se desloca na madeira, a permeabilidade tem magnitudes diferentes.

Silva et al. (2010) consideram que quanto maior for a viscosidade do fluido, menor será o fluxo e a permeabilidade. A permeabilidade à água é inferior à gasosa devido à viscosidade dos fluidos, sendo a viscosidade da água 55 vezes maior que a do ar atmosférico (SIAU, 1984). Santos et al. (2003), por exemplo, analisando as taxas de secagem para diferentes teores de umidade, concluíram que a madeira de *Eucalyptus* não é permeável ao fluxo de líquidos.

A temperatura e a pressão também podem afetar a facilidade com que um fluido é transportado, com efeitos no processo de difusão, na uniformidade de fluxo e na permeabilidade da madeira (PÖTZSCH; RÜTHER, 2009; SIAU, 1984).

Siau (1984) aponta que elevados gradientes de pressão resultam em uma menor uniformidade de fluxo e menores permeabilidades. Skaar (1972) considera que há relação entre o fluxo de umidade na madeira e a temperatura, e, com a elevação da temperatura, maiores são a agitação molecular e a evaporação da umidade superficial. Siau (1984) aponta que a temperatura é um fator limitante ao movimento capilar, pois, em temperaturas mais altas, a viscosidade da água é reduzida, provocando um maior fluxo de água livre. Galvão e

Jankowsky (1985) mencionam que o aumento da temperatura resulta em um maior grau de agitação das moléculas de água e energia cinética, o que favorece o fluxo.

## **2.5 Secagem da madeira de *Eucalyptus***

A secagem da madeira é uma das etapas do processamento de madeira sólida responsáveis por melhor agregar valor ao produto final. É uma operação complexa, que envolve a transferência de calor e de massa, com diferentes taxas de transformações físicas e químicas (HART, 1966).

O processo de secagem é de grande importância, uma vez que proporciona, entre outros benefícios, redução de massa, redução dos custos de transporte e de manuseio, aumento da resistência mecânica, redução da instabilidade dimensional, aumento da resistência a fungos apodrecedores e manchadores, melhoria do comportamento da madeira na usinagem e no acabamento superficial e aumento do isolamento térmico, elétrico e acústico (MARTINS, 1988).

Como qualquer etapa do processamento da madeira, a secagem deve ser conduzida de forma racional e criteriosa, a fim de se obter produtos competitivos e com considerável padrão de qualidade. De acordo com Galvão e Jankowski (1985), os cuidados devem ser ainda maiores quando se trabalha com madeiras pouco permeáveis, já que maiores também são o tempo de secagem e a propensão aos defeitos.

Madeiras do gênero *Eucalyptus* podem ser consideradas como de secagem lenta, difícil e complexa, devido, principalmente, à baixa permeabilidade a líquidos e a gases, a qual reflete em um acentuado gradiente de umidade, elevadas contrações, maior suscetibilidade ao colapso, rachaduras e

altas tensões de secagem (BARBOSA et al., 2005; CALONEGO; SEVERO, 2004; SEVERO, 2000; VERMAAS, 1995).

A dificuldade do movimento de fluidos e da saída de água do interior de peças de madeira de *Eucalyptus* está ligada também à própria constituição anatômica. Pontoações de pequeno diâmetro, tiloses, baixa frequência e pequeno diâmetro de vasos e pequena largura de raios afetam a permeabilidade da madeira e dificultam o fluxo (ALZATE, 2004).

Baseando-se em uma caracterização anatômica realizada por Rocha et al. (2004), é possível elencar os caracteres mais influentes na dificuldade de secagem da madeira de *Eucalyptus*. Tiloses, que obstruem o lume dos vasos, reduzem a permeabilidade e a taxa de secagem. Os vasos dispersos, pouco numerosos, com pequenos a médios diâmetros, predominantemente solitários e difusos contribuem para uma secagem mais lenta. As placas de perfuração simples, embora mais eficientes, não são totalmente seguras, pois bolhas de ar podem obstruir o fluxo em toda a extensão do vaso. Apesar da abundância, as pontoações são pequenas em diâmetro, dificultando ainda mais a secagem (CHOAT et al., 2008). Os raios podem até ser numerosos, mas extremamente baixos e finos, resultando em uma velocidade de secagem mais lenta.

Além da baixa permeabilidade e da constituição anatômica peculiar, a manifestação de tensões de crescimento contribui para uma maior propensão ao aparecimento de defeitos, tornando a secagem da madeira de *Eucalyptus* ainda mais complexa (CALONEGO et al., 2006).

De acordo com Santos (2002), outro fator responsável pela dificuldade de secagem e pelo maior índice de defeitos de secagem de *Eucalyptus* é a variação nos padrões de distribuição da umidade na direção radial e longitudinal da madeira. Para madeira de *Eucalyptus grandis*, Oliveira et al. (2005) constataram acentuados gradientes de umidade em perfil longitudinal e radial no tronco, atingindo valores máximos de 40% e 70%, respectivamente. E estes

elevados gradientes, por sua vez, se manifestam principalmente em função da baixa permeabilidade.

Em termos de avaliação da qualidade da secagem, diversos autores, como Barbosa et al. (2005), Calonego et al. (2006), Ciniglio (1998), Martins et al. (2001) e Santos (2002), constataram a alta suscetibilidade da madeira de *Eucalyptus* aos defeitos como colapso, rachaduras de topo, rachaduras superficiais, torcimento e encanoamento, manifestações estas em decorrência da combinação dos fatores já mencionados.

Frente às dificuldades de secagem da madeira de *Eucalyptus*, muitos pesquisadores têm buscado técnicas auxiliares. Além de adotar programas de secagem “suaves”, que utilizam baixas temperaturas e altas umidades relativas até completa remoção de água livre, métodos complementares são atrativos, como o emprego de pré-tratamentos, na tentativa de aumentar a permeabilidade e a qualidade da madeira seca (BARBOSA et al., 2005; SANTOS, 2002).

## **2.6 Defeitos de secagem**

Defeitos de secagem são alterações e deformações na estrutura da madeira geradas por tensões internas decorrentes de contrações irregulares e/ou rápida saída de água, resultando em perdas de madeira e queda do padrão de qualidade da madeira seca (RASMUSSEN, 1961; SIMPSON, 1991).

Empenamentos, rachaduras e colapso são exemplos de defeitos de secagem e podem decorrer de um processo de secagem inadequado, das próprias características da madeira ou da combinação de ambos (SANTOS et al., 2003; SIMPSON, 1991).

Durante o processo de saída de água da madeira, as camadas superficiais da peça ficam sob esforço de tração e o centro sob compressão. Dessa forma, abaixo do ponto de saturação das fibras ocorrem as contrações que, em função

da anisotropia da madeira, se manifestam de forma diferente nos planos e ocasionam as rachaduras e os empenamentos diversos (MCMILLEN; WENGERT, 1978).

Os empenamentos são causados por diferenças de contrações radiais e tangenciais e podem ser classificados em encurvamento ou empenamento longitudinal, encanoamento, arqueamento e torcimento. O encurvamento é caracterizado por uma curvatura ao longo do comprimento da face, em um plano perpendicular à superfície. O encanoamento é um empenamento transversal da face da peça, ou seja, é uma curvatura ao longo da largura. O arqueamento é uma curvatura ao longo do comprimento da peça, em um plano paralelo à face. Já o torcimento, ou torção, é um empenamento helicoidal da peça em que ocorrem distorções tanto no comprimento como na largura dessa peça (RASMUSSEN, 1961).

As rachaduras são aberturas estreitas ou longas que aparecem nas faces e nos topos das peças, em consequência de uma diferença de umidade acentuada entre regiões superficiais e internas, a qual gera uma tensão de tração transversal que excede à resistência da madeira e provoca a separação das fibras. Podem ser causadas também por tensões de crescimento e diferenças nas contrações radiais e tangenciais, que resultam em ruptura da madeira nas regiões mais fracas (RASMUSSEN, 1961). As rachaduras mais comuns são as superficiais, que ocorrem na face das peças de madeira e as de topo que, como o próprio nome já diz, ocorrem nas extremidades das peças. Pode haver ainda rachaduras internas, conhecidas por favo de mel, normalmente resultantes de fendas superficiais que se fecharam na superfície ou de rupturas por tração no interior da peça (GALVÃO; JANKOWSKI, 1985).

Já o colapso pode ser definido como o esmagamento interno de fibras e traqueídes, resultando em significantes deformações e ondulações na superfície da peça de madeira (SKAAR, 1972). Este defeito ocorre acima do ponto de

saturação das fibras, antes que a contração normal tenha iniciado, e está ligado à condição em que a tensão capilar para o movimento de água livre excede à resistência à compressão perpendicular às fibras e gera uma forte compressão no interior da peça, normalmente em função da rápida saída de água em uma secagem drástica.

O colapso é um dos principais defeitos associados à secagem da madeira de *Eucalyptus* e que mais depreciam a sua qualidade (CHOONG et al., 1999). Em células de vaso e parênquima axial esse defeito não ocorre espontaneamente, mas esses elementos podem ser distorcidos pela tensão associada às fibras e às traqueídes.

O colapso caracteriza-se por uma retração anormal da madeira e ocorre com maior frequência em regiões de cerne. Sua ocorrência está ligada à baixa permeabilidade, como a das madeiras de *Eucalyptus grandis* e de *E. dunnii*. A permeabilidade no lenho de *Eucalyptus* é muito variável e decresce bruscamente do alburno para o cerne, influenciando diretamente os índices deste defeito (MIAO et al., 2010). Rozas (1993) e Severo (2000), por exemplo, observaram colapso forte (ondulações superiores a 0,4 cm) para as madeiras destas espécies em 35% a 40% das peças submetidas a uma secagem convencional.

A ocorrência do colapso também está relacionada à estrutura anatômica da madeira, como o pequeno diâmetro dos elementos vasculares e pontoações, o tamanho e a proporção de tecidos, as altas temperaturas e as baixas umidades relativas no início da secagem, os longos períodos de secagem e a alta tensão superficial do líquido removido da madeira. Qyiang et al. (2006) encontraram correlações maiores que 0,4 entre caracteres anatômicos de fibras, raios e vasos com o colapso.

A quantidade de extrativos presentes na madeira afeta a intensidade do colapso, uma vez que eles obstruem as aberturas das pontoações, dificultando o

movimento de fluidos (BARBOSA et al., 2005; BARISKA, 1992; GALVÃO; JANKOWSKI, 1985; HART, 1984; SIAU, 1971).

Além dos defeitos mencionados, pode ocorrer, ainda, um defeito conhecido como endurecimento superficial ou encruamento e avaliado pelo teste do garfo. Uma secagem muito rápida e desuniforme nos estágios iniciais faz com que as camadas superficiais de uma peça de madeira atinjam rapidamente baixos valores de umidade, enquanto a parte central ainda permanece com umidade elevada, caracterizando-se pelo desenvolvimento de esforços de compressão na superfície e de tração no interior da peça (PRAT, 1974; SANTOS, 2002).

Diante da gama de defeitos que podem surgir, a secagem da madeira de *Eucalyptus* deve ser conduzida de forma bastante cuidadosa. Utilizando-se técnicas e condições apropriadas, é possível minimizar os defeitos e reduzir as perdas em volume de madeira que aumentam os custos do produto final (MARTINS et al., 2001).

## **2.7 Pré-tratamentos de secagem**

A madeira do gênero *Eucalyptus* requer uma secagem criteriosa em decorrência da maior propensão ao desenvolvimento de empenamentos, rachaduras e colapso, durante o processo de secagem. Sendo assim, sua secagem em estufa deve se iniciar e se manter com temperaturas inferiores a 45 °C, até a completa remoção de água livre, porém, o emprego de programas de secagem considerados suaves aumenta o tempo de secagem e onera o processo produtivo (RASMUSSEN, 1961; SEVERO, 2004; SIMPSON, 1991; VEERMAS, 1995).

Diante disso, diferentes técnicas preliminares à secagem, como imersão em água quente, acondicionamento a baixas temperaturas ou próximas de 0 °C, congelamento da madeira verde, vaporização aquecida, troca de solventes,

ultrassom, modificação química e mistura de gases, vêm, há alguns anos, sendo avaliadas com o objetivo comum de minimizar defeitos de secagem, aumentar o fluxo, a permeabilidade e a taxa de secagem e, ainda, reduzir os custos e as perdas em matéria-prima no processo (GLOSSOP, 1994; HANSMANN et al., 2002; SIAU, 1984; VEERMAS, 1995).

As técnicas de congelamento, acondicionamento a baixas temperaturas e imersão em água quente, entre outras, foram inicialmente estudadas nas décadas de 1950 e 1960, com o objetivo de provocar mudanças nas propriedades físicas e químicas da madeira, alívio das tensões de secagem e aumento da permeabilidade e das taxas de secagem (CALONEGO; SEVERO, 2004; COOPER et al., 1970; ILIC, 1995; OLIVEIRA et al., 2003; SIAU, 1984). Na Tabela 1 são apresentados alguns desses tratamentos e os seus prováveis efeitos no fluxo, na secagem e na permeabilidade da madeira.

Tabela 1 Pré-tratamentos de secagem e efeitos no fluxo, na secagem e na permeabilidade da madeira

<b>Tratamento(s)</b>	<b>Efeitos/resultados</b>	<b>Referência</b>
Troca de solventes com metanol e benzeno	Redução das forças de tensão superficial devido à substituição da água livre por fluido de menor tensão superficial e aumento do fluxo em 31 vezes	Petty e Puritch (1970)
Mistura de gases com oxigênio e ozônio	Ataque dos gases à parede secundária e degradação da membrana das pontoações obstruídas; eficiência na desobstrução e aumento do fluxo.	Lantican et al. (1965)
Ultrassom a 20 kHz	Dilatação do diâmetro das pontoações com as vibrações acústicas e aumento da permeabilidade.	Tanaka et al. (2010)
Micro-ondas a 2,45 GHz	Ataque da radiação ao tecido celular, amolecimento das substâncias incrustantes, dilatação do diâmetro dos elementos vasculares, deformação na estrutura de tiloses, evaporação abrupta de água, mudança no gradiente de pressão e aumento do coeficiente de difusão e do fluxo; aumento da permeabilidade em 5 vezes.	Dashti et al. (2012) e Torgovnikov e Vinden (2009)
Vaporização aquecida a 90 °C e saturada	Aumento do coeficiente de difusão e alteração no perfil de distribuição de extrativos, com movimentação junto à água em resposta ao gradiente de umidade; aumento do fluxo e da permeabilidade da madeira.	Choong et al. (1999) e Zhang e Cai (2008)
Vaporização aquecida a 100 °C, durante 3 horas	Hidrólise de componentes químicos, remoção parcial de extrativos, redução do gradiente de umidade entre camadas externas e internas de 15%; aumento das taxas de secagem em 6%.	Guoxing et al. (2003) e Severo et al. (2013)
Vaporização aquecida a 160 °C, durante 1 hora	Favorecimento do fluxo com o aumento da temperatura e aumento da permeabilidade ao ar em 22%.	Dashti et al. (2012)

Apesar do efeito positivo dos pré-tratamentos para o fluxo, para a permeabilidade e para a taxa de secagem da madeira, rachaduras internas e superficiais podem se desenvolver na peça, dependendo das condições de

duração e temperatura, havendo queda da qualidade da madeira para um determinado uso (GIOVANELLA; MUÑIZ, 2010).

Mudanças não significativas na permeabilidade também já foram reportadas, possivelmente devido a diferenças no material biológico utilizado, além de procedência, umidade, densidade, métodos de determinação da permeabilidade e condições de tempo e temperatura do tratamento. No estudo de Rhatigan et al. (2003), por exemplo, não foram observadas variações na permeabilidade com o tratamento de vaporização aquecida e saturada em tábuas de *Tsuga heterophylla*. Cai e Oliveira (2007) também não constataram mudanças na permeabilidade ao ar após a vaporização a 100 °C e saturada da madeira de abeto na condição verde, durante 4 horas.

### **2.7.1 Imersão em água quente**

O pré-tratamento de imersão em água quente consiste em colocar a madeira úmida em um meio com água aquecida, variando-se as temperaturas e os períodos de duração. A intensidade de mudanças físico-químicas na madeira dependerá das condições do pré-tratamento (CAMPBELL, 1961; CHAFE, 1992; KININMONTH, 1971).

Dias-Vaz et al. (1998), por exemplo, citam, para a madeira do gênero *Eucalyptus*, temperaturas de tratamento de 40 a 60 °C e duração de 4 a 8 dias. Já Oliveira et al. (2003) trabalharam com períodos inferiores e maiores temperaturas para a madeira de *Eucalyptus grandis*, no caso 24 horas e 90 °C, respectivamente. Coneglian et al. (2009) descrevem que o tempo de aquecimento das regiões centrais e periféricas da madeira de *Eucalyptus grandis* são diferentes, sendo necessárias, em média, 15 horas para alcançar respectivas temperaturas de 60 e 80 °C.

Um dos prováveis efeitos da imersão da madeira em água quente no fluxo e na secagem é a remoção e/ou a redistribuição de alguns extrativos polifenólicos que obstruem as membranas das pontoações e o lume celular (HASLETT; KININMONTH, 1986). Com a remoção de alguns extrativos, os efeitos de colapsos severos e rachaduras favos de mel podem ser minimizados e a permeabilidade aumentar (KEEY; LANGRISH; WALKER, 2000).

Diaz-Vaz et al. (1998) consideram que a imersão em água quente modifica a estrutura da membrana das pontoações, promovendo uma dilatação e facilitando a remoção da água da madeira. Outro efeito é o aumento do coeficiente de difusão da madeira com a elevação da temperatura e por meio de mudanças do perfil de distribuição de extrativos, aumentando-se o fluxo e, conseqüentemente, a taxa de secagem (ALEXIOU et al., 1990).

Aguiar e Perré (2005) relatam que, em condições de saturação e aquecimento da madeira, os polímeros amorfos atingem temperaturas de transição vítrea que, segundo Figueroa e Moraes (2009), é a passagem de um estado desordenado para outro maior, no qual as cadeias poliméricas têm maior mobilidade, tornando-se mais fluidas e flexíveis e retornando ao estado sólido sem modificações estruturais. Para o *Eucalyptus grandis*, esta temperatura de transição vítrea é próxima de 82 °C (QUIRINO; VALE, 2002). Em virtude da maior fluidez molecular e do conseqüente amolecimento da estrutura física da madeira, há um alívio de tensões internas, o que possibilita reduzir os níveis de defeitos de secagem (CALONEGO; SEVERO, 2005).

A técnica de imersão em água quente é uma boa alternativa para reduzir a higroscopicidade e as contrações elevadas, contribuindo para a redução da instabilidade dimensional, o aumento do fluxo e da permeabilidade, a atenuação dos defeitos e a secagem mais rápida (CHOONG et al., 1999; DIAZ-VAZ et al., 1998; KEEY; LANGRISH; WALKER, 2000; SKAAR, 1972).

Haslett e Kininmonth (1986) afirmam que a imersão em temperaturas da água inferiores a 70 °C não têm efeito significativo sobre a permeabilidade e a taxa de secagem. Trabalhando com espécies *Nothofagus fusca* e *N. truncata*, folhosas do sul da Nova Zelândia, estes autores constataram que a imersão em temperaturas de 80 a 100 °C favoreceu o fluxo e reduziu em 60% o tempo de secagem para as duas espécies. Observaram também que a temperatura de 80 °C é tão efetiva quanto a de 100 °C, além de um menor período de imersão apresentar a mesma eficácia de um longo período. Os autores recomendam períodos de imersão de uma a quatro horas de duração, dependendo da espessura das peças de madeira.

Tejeda et al. (1997) constataram que a imersão de pequenas amostras de madeira de *Cryptomeria japonica* a temperaturas médias de 80 °C e durante 70 horas reduziu em 50% as tensões internas desenvolvidas posteriormente na secagem.

Choong et al. (1999) trabalharam a técnica de imersão em água quente (100 °C) em amostras de madeira de *Pinus*, durante 10 horas; o tratamento aumentou a difusão devido a possíveis alterações no perfil de distribuição de extrativos.

Vivian et al. (2010) avaliaram a influência da imersão em água quente na taxa de secagem de tábuas de *Hovenia dulcis*. A temperatura de 85 °C foi adotada e dois tempos de tratamento, 12 e 24 horas. A secagem foi conduzida posteriormente, em duas temperaturas, 60 e a 90 °C, verificando-se que a maior taxa de secagem foi para a condição de 12 horas e de secagem a 90 °C, com acréscimos na taxa de secagem em até 120% em relação à testemunha. Vivian et al. (2011), trabalhando com o mesmo material, não constataram variações significativas na contração em função da imersão em água quente, sendo estes efeitos mais pronunciados na redução do encurvamento e na incidência de rachaduras.

Glossop (1994) estudou o efeito da imersão em água quente (100 °C) na taxa de secagem e nos defeitos de secagem em tábuas de *Eucalyptus marginata* e de *E. diversicolor*. Os resultados indicaram que com o pré-tratamento houve uma redução no índice de rachaduras e as tábuas pré-tratadas atingiram o ponto de saturação das fibras 30% mais rápido que as tábuas não tratadas. Entre as possíveis explicações apontadas pelo autor para o benefício da imersão estão o aumento do coeficiente de difusão e um aumento da permeabilidade.

Oliveira et al. (2003) analisaram a influência da imersão em água quente em amostras de madeira de *Eucalyptus grandis* a 85-90 °C, durante 24 horas. Concluiu-se que a técnica foi favorável no aumento da taxa de secagem em até 52% em relação à testemunha, devido ao favorecimento de movimento de água pela remoção de extrativos e desobstrução de vasos e pontoações. Estudando o mesmo material, Oliveira (2003) observou que o tratamento foi ineficiente na redução de rachaduras de topo e de rachaduras internas, em virtude da maior taxa de secagem e do provável aumento das forças de compressão e tração no interior da madeira com a elevação da temperatura.

Segundo Keey, Langrish e Walker (2000), como as madeiras de *Eucalyptus* são notoriamente difíceis de secar sem que haja uma degradação, uma das melhores práticas preliminares à secagem é a imersão em água quente. Porém, segundo Haslett e Kininmonth (1986) e Skaar (1972), dependendo da intensidade e duração, o pré-tratamento pode aumentar a propensão da madeira à modificação da cor original, além da ocorrência de perdas em massa e redução de propriedades mecânicas, comprometendo a sua utilização. Taghiyari et al. (2011) ressaltam, ainda, que a imersão em água quente, ao contrário de aumentar o fluxo como outros pesquisadores afirmam, pode reduzir a permeabilidade, devido à deposição de extrativos nas placas de perfuração dos vasos.

### 2.7.2 Acondicionamento a baixas temperaturas e congelamento

Os métodos de acondicionamento a baixas temperaturas e de congelamento não são definidos de forma clara, considerando-se, a princípio, a temperatura de solidificação da água.

No acondicionamento a baixas temperaturas, geralmente, a madeira úmida é armazenada em um meio, como, por exemplo, um refrigerador com temperaturas próximas de 0 °C ou a 0 °C, enquanto no congelamento as temperaturas de tratamento são inferiores a 0 °C (BABINSKI, 2011; ERICKSON et al., 1968; ILIC, 1999; WRIGHT, 1967).

Com relação aos métodos, Angell et al. (2008) ressaltam que a água passa do estado líquido para o sólido a uma temperatura de 0 °C, em superfícies livres, mas, em condições de confinamento e de baixas temperaturas, um comportamento anômalo se manifesta de forma mais pronunciada. Em sólidos, mesmo abaixo de 0 °C, pode não haver transformação da água em gelo, admitindo-se que o líquido atinja uma condição de elevada estabilidade e de não rompimento de ligações de hidrogênio. Segundo Moreira (2009), a água livre só pode ser resfriada e originar cristais até a temperatura de -37 °C. Já para temperaturas inferiores, as teorias propostas para explicar o comportamento da água não podem ser comprovadas experimentalmente.

Os pré-tratamentos a baixas temperaturas e de congelamento ainda são pouco conhecidos para espécies madeireiras do Brasil e têm sido testados com a hipótese de que são benéficos para reduzir a contração e os defeitos de secagem, além de aumentar a permeabilidade da madeira e a taxa de secagem. Cooper e Barham (1975) afirmam que as madeiras do gênero *Eucalyptus* apresentam grande benefício com o pré-congelamento, em termos de redução de defeitos e aumento do fluxo e da velocidade de secagem.

Não há um consenso sobre as condições ideais de tempo e de temperatura dos pré-tratamentos, uma vez que em cada um os processos de transferência de calor, difusividade e condutividade são distintos, além de madeiras diferentes apresentarem comportamentos variados. Erickson et al. (1966), por exemplo, mencionam, para madeiras em geral, temperaturas inferiores a  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por 3 a 8 horas.

Giovanella e Muniz (2010) trabalharam com temperaturas de  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , durante 24 horas, na madeira de *Pinus* e Oliveira (2003) adotou temperaturas entre  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pelo mesmo período, para a madeira de *Eucalyptus grandis*.

Keey, Langrish e Walker (2000) recomendam tempos de tratamento em torno de 4 horas e Oliveira et al. (2003) citam que os períodos mais adotados são de 12 a 24 horas. Os mesmos autores afirmam, ainda, que temperaturas próximas de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  são mais adequadas para o congelamento da madeira, embora algumas espécies possam apresentar respostas diferentes em outras condições.

Várias explicações têm sido feitas para explicar o efeito dos pré-tratamentos na secagem da madeira. Acredita-se que o principal mecanismo de redução de defeitos deve-se à migração da umidade da parede celular para o lume com a água congelada ou próxima do congelamento, gerando contração. A transformação da água para gelo conduz a uma expansão de água no lume, o que resulta em uma compressão da parede celular que, juntamente com a perda de umidade, torna as células mais rígidas e que retraem e colapsam menos (ERICKSON et al., 1966, 1968; ILIC, 1995).

Awoyemi (2009) avaliou o efeito do congelamento a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , durante 90 horas, nas propriedades mecânicas da madeira de *Betula pubescens*, constatando-se melhorias na rigidez das células e maior resistência ao efeito das altas temperaturas de secagem.

Certos tipos de extrativos também migram para a parede celular durante o congelamento e podem desempenhar um papel de reforço (ERICKSON, 1966, 1968; KUBLER, 1962 citado por ILIC, 1999).

Siau (1984) aponta que, com o emprego desses pré-tratamentos, as tensões superficiais na interface ar-água são minimizadas e/ou eliminadas, possibilitando aumentar o fluxo, a permeabilidade e as taxas de secagem.

Glossop (1994) observou que tábuas de *Eucalyptus marginata* e *E. diversicolor* submetidas ao congelamento (-20 °C) atingiram o ponto de saturação das fibras 10% mais rápido do que tábuas não congeladas. O autor afirma que umas das prováveis explicações para o menor tempo de secagem é o aumento do fluxo e da permeabilidade, a qual não foi mensurada no trabalho.

Ilic (1999) estudou o efeito do congelamento da madeira de *Eucalyptus regnans* à temperatura de -20 °C, por 72 horas e concluiu que houve uma redução média de 36% na magnitude do colapso, mas a taxa de secagem não foi alterada. A redução do diâmetro dos capilares e a compressão da parede celular em função da presença de cristais de gelo dificultaram o fluxo de água.

No congelamento da madeira de *Juglans nigra* em temperaturas de -18 a -70 °C, Cooper et al. (1970) obtiveram como resultados a redução da retração volumétrica em até 40%, a remoção parcial de extrativos, o aumento do fluxo, a redução de colapso e de rachaduras favo de mel.

Choong et al. (1973) demonstraram que o congelamento a -20 °C da madeira verde de *Eucalyptus delegatensis* proporcionou uma redução média de 40% nos índices de colapso, mas, por outro lado, a madeira apresentou mais rachaduras superficiais, observação semelhante à obtida por Giovanella e Muniz (2010). Estes autores constataram que, com o aumento do volume da água e a redução de volume dos constituintes da madeira, aumenta a pressão interna dos tecidos, o que favorece o aparecimento de rachaduras acompanhadas

de queda na resistência mecânica, além da migração de cristais de gelo para a superfície, os quais podem dificultar o fluxo.

Vivian et al. (2010) avaliaram o efeito do pré-congelamento a  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  em madeira de *Hovenia dulcis*, em dois tempos de exposição, 12 e 24 horas e concluíram que, para o tempo de 24 horas, seguido de uma secagem a altas temperaturas ( $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), o desempenho foi superior, com uma taxa de secagem 2,4 vezes superior em relação à testemunha. Vivian et al. (2011), trabalhando com o mesmo material e analisando defeitos de secagem, concluíram que o congelamento foi eficiente na redução do encurvamento, mas aumentou em 3 vezes os índices de rachaduras.

Apesar dos benefícios reportados, alguns autores não obtiveram resultados satisfatórios com a técnica. Haslett e Kininmonth (1986), trabalhando com madeira de *Nothofagus fusca*, de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por 24 horas, não constataram o aumento da taxa de secagem e a redução de contrações, observando, ainda, aumentos no índice de rachaduras.

Oliveira et al. (2003) não encontraram alteração na taxa de secagem, aplicando, na madeira de *Eucalyptus grandis*, um tratamento de congelamento a  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por 24 horas. Uma influência negativa do congelamento ao fluxo pode ser a propagação de bolhas de ar nas cavidades celulares saturadas de água, principalmente nas pontoações, em que a condutividade de água reduz em até 50% (CHOAT et al., 2003).

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Obtenção e processamento do material**

Foram utilizadas madeiras de quatro árvores, sendo duas de *Eucalyptus grandis* e duas de *Eucalyptus dunnii*, provenientes de plantio experimental pertencente à Universidade Federal de Lavras (UFLA), no espaçamento de 3,0 x 2,0 m, com idade de 37 anos.

As árvores foram abatidas e seccionadas em toras, sendo selecionada e identificada por árvore uma tora da base com comprimento de 4,0 m e diâmetro médio de 70,0 cm.

As toras foram enviadas à Unidade Experimental de Desdobro e Secagem da Madeira, no Departamento de Ciências Florestais da UFLA, onde foram desdobradas para a obtenção do pranchão, cuja espessura média foi de 18,0 cm. Na sequência, os pranchões foram encaminhados ao Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira, na mesma universidade, para processamento e confecção dos corpos de prova utilizados na determinação das propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira e nos ensaios de secagem a 100 °C em estufa.

#### **3.2 Preparo e confecção de corpos de prova**

Cada pranchão passou por aplainamento e corte, sendo, então, seccionado em sarrafos para permeabilidade, secagem, análise química, caracterização anatômica, densidade básica e umidade inicial da madeira, conforme esquema de amostragem apresentado na Figura 3.

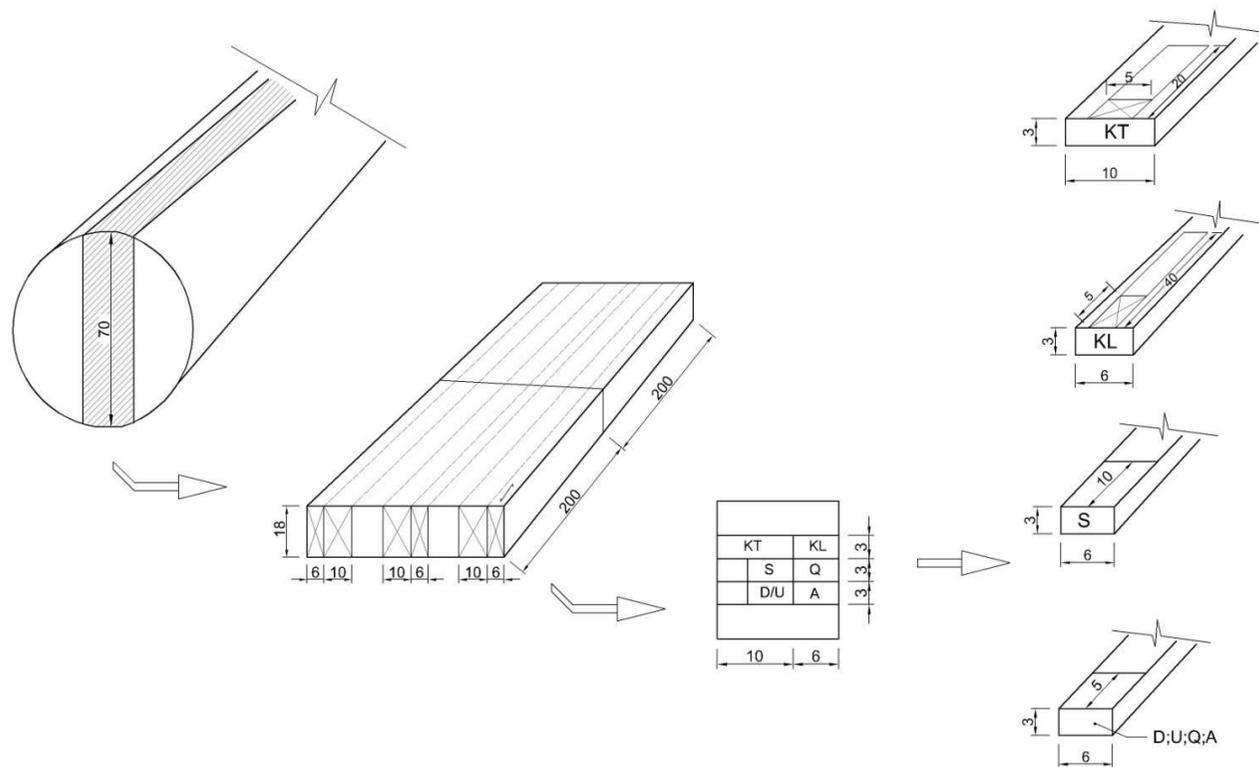


Figura 3 Esquema de amostragem para retirada de sarrafos de permeabilidade longitudinal às fibras (KL) e transversal às fibras (KT), secagem a 100 °C (S), análise química (Q) e anatômica (A), densidade básica (D) e umidade inicial (U); unidades expressas em cm

Os sarrafos destinados aos ensaios de permeabilidade longitudinal e transversal às fibras foram inicialmente cortados em seções retangulares de comprimentos iguais a 40,0 cm e 20,0 cm, respectivamente. Cada seção foi torneada (Figura 4), obtendo-se a forma cilíndrica com 2,0 cm de diâmetro, de acordo com a metodologia de Baraúna (2010).



Figura 4 Torneamento de seções retangulares para os ensaios de permeabilidade da madeira

Após este procedimento, as seções torneadas foram cortadas em corpos de prova de 5,0 cm de comprimento, para os ensaios de permeabilidade, obtendo-se 336 corpos de prova por espécie e para cada direção, longitudinal e transversal às fibras.

Os corpos de prova foram acondicionados em câmara climática à temperatura de  $(20\pm 3)$  °C e umidade relativa de  $(65\pm 5)\%$  até a estabilização da massa, cuja umidade de equilíbrio higroscópico média foi de 12%.

Transcorrida a etapa de climatização, os corpos de prova foram impermeabilizados na superfície lateral com adesivo estrutural epóxi Compound Adesivo Tix Vedacit<sup>®</sup>, utilizando-se pincel e seguindo-se as recomendações de

preparo e aplicação do fabricante. A fim de se garantir o fluxo nos ensaios e nas direções desejadas, apenas os topos não foram impermeabilizados, com a precaução de evitar o escoamento do produto nos mesmos e não deixar regiões da superfície lateral sem recobrimento. Para a cura do adesivo, os corpos de prova foram acondicionados na mesma câmara climática, permanecendo, em média, oito dias para estabilização. O procedimento de impermeabilização está ilustrado na Figura 5.



Figura 5 Impermeabilização da superfície lateral dos corpos de prova utilizados nos ensaios de permeabilidade da madeira

Os sarrafos para os ensaios de secagem em estufa de laboratório a 100 °C de cada espécie foram aplainados e cortados em 168 corpos de prova com dimensões nominais de 10,0 x 5,0 x 1,0 cm, conforme a metodologia de Barbosa et al. (2005), sendo posteriormente medidos com auxílio de paquímetro digital de precisão 0,01 mm.

Os sarrafos para a determinação da densidade básica e da umidade inicial, a caracterização anatômica e a análise química foram aplainados e seccionados em corpos de prova com dimensões de 5,0 x 3,0 x 2,0 cm, sendo os de caracterização anatômica e química reservados para análises posteriores. As

determinações da densidade básica e da umidade inicial médias por espécie foram realizadas conforme os procedimentos das normas NBR11941/2003 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003a) e NBR7190/1997 (ABNT, 1997). O máximo teor de umidade foi determinado segundo Smith (1954 citado por SKAAR, 1972), a partir da Equação 7.

$$MTU = \frac{1,5 - \rho_b}{1,5 \times \rho_b} \times 100 \quad (7)$$

em que

MTU = máximo teor de umidade, %;

$\rho_b$  = densidade básica da madeira;  $\text{g.cm}^{-3}$ .

### 3.3 Determinação da permeabilidade da madeira

O ensaio de permeabilidade da madeira foi realizado de acordo com a metodologia descrita no trabalho de Silva (2007), adaptada por Baraúna (2010). Os diâmetros e os comprimentos dos corpos de prova foram medidos antes dos ensaios, com auxílio de paquímetro digital de precisão 0,01 mm.

A permeabilidade da madeira foi determinada em equipamento permeâmetro para líquidos e gases (Figura 6), utilizando-se os fluidos água destilada e ar atmosférico proveniente de bomba de vácuo, nas direções longitudinal e transversal às fibras. O permeâmetro para medição do fluido gasoso foi composto basicamente de um suporte para o corpo de prova, mangueiras de silicone e rotômetros em série, com três escalas de leitura de vazão: 10 a 100  $\text{L.h}^{-1}$ , 10 a 180  $\text{L.h}^{-1}$  e 100 a 1.100  $\text{L.h}^{-1}$ , interligando-se o sistema à bomba de vácuo. Para medição do fluido líquido, além do suporte e

mangueiras, foram utilizadas bureta, junta cônica de vidro e rolhas de borracha e de teflon conectadas à bomba de vácuo.

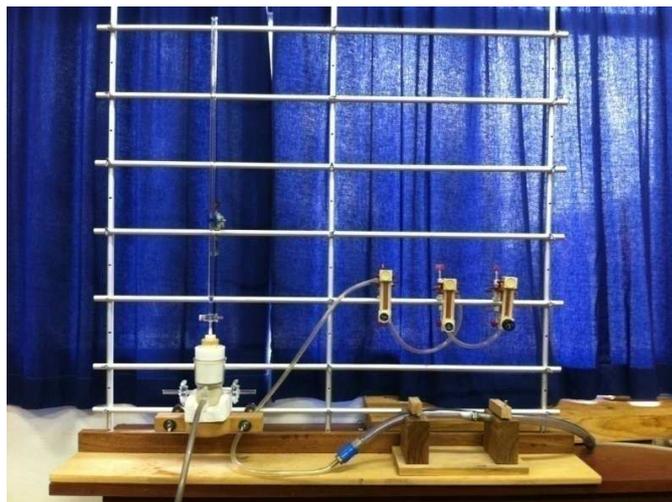


Figura 6 Permeâmetro para a determinação da permeabilidade da madeira

No teste da permeabilidade ao ar, os corpos de prova foram colocados em mangueira de silicone, com vedação à base de cola quente e ajuste com braçadeiras metálicas. Em uma extremidade do corpo de prova foi aplicada sucção, por meio da bomba de vácuo e em outra foram conectados os medidores de vazão. A leitura de vazão de ar nos corpos de prova foi obtida nos rotômetros no momento em que o fluxo apresentou-se constante, obtendo-se, ainda, a pressão final indicada no manômetro da bomba de vácuo. A permeabilidade ao ar média da madeira, seguindo-se a Lei de Darcy, foi determinada de acordo com a Equação 8.

$$K_{ar} = \frac{Q \times L \times P}{A \times \Delta P \times \bar{P}} \quad (8)$$

em que

$K_{ar}$  = permeabilidade ao ar;  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

$L$  = comprimento na direção do fluxo, cm;

$P$  = pressão inicial, atm;

$A$  = área seccional do corpo de prova,  $\text{cm}^2$ ;

$\Delta P$  = diferencial entre pressão inicial e final, atm;

$\bar{P}$  = média aritmética entre pressão inicial e final, atm;

$Q$  = vazão obtida no rotâmetro,  $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Na determinação da permeabilidade à água destilada, no lugar dos rotâmetros, utilizou-se uma bureta graduada de 50 ml, para medição do volume de líquido escoado no corpo de prova e cronômetro para a obtenção do tempo de escoamento, conforme recomendações de Silva (2007). Um conjunto de rolhas de teflon e de borracha foi utilizado para comportar o corpo de prova (Figura 7), com vedação de cola quente e braçadeiras metálicas para melhor ajuste. Este conjunto de rolhas foi colocado no interior de uma junta cônica de vidro, em que uma abertura foi conectada à bomba de vácuo para sucção e a outra foi conectada à bureta com água destilada. A permeabilidade à água média também foi determinada com base na Lei de Darcy, utilizando-se a Equação 9.

$$K_L = \frac{V \times L}{t \times A \times \Delta P} \quad (9)$$

em que

$K_L$  = permeabilidade à água destilada,  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

$V$  = volume do líquido escoado,  $\text{cm}^3$ ;

$L$  = comprimento na direção do fluxo,  $\text{cm}$ ;

$t$  = tempo de escoamento do líquido,  $\text{s}$ ;

$A$  = área da seção transversal,  $\text{cm}^2$ ;

$\Delta P$  = diferencial de pressão entre inicial e final,  $\text{atm}$ .



Figura 7 Conjunto de rolhas utilizado para suporte do corpo de prova na determinação da permeabilidade da madeira à água destilada

### 3.4 Secagem da madeira e avaliação dos defeitos de secagem

O processo de secagem dos corpos de prova foi realizado em estufa elétrica de laboratório, sem circulação de ar, a  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , admitindo-se que, quando submetidas à secagem drástica, seções de menores dimensões apresentam comportamentos semelhantes aos que possivelmente ocorrem na secagem convencional de tábuas (CINIGLIO, 1988; TEREZAWA, 1965).

O monitoramento da secagem foi realizado por meio de pesagens periódicas dos corpos de prova, adotando-se intervalos de uma hora. A secagem foi finalizada quando os corpos de prova apresentaram umidade média de 5%,

conforme a metodologia de Barbosa et al. (2005). Posteriormente, os corpos de prova foram secos em estufa, a  $(105\pm 3)$  °C, para a obtenção da massa seca e a umidade foi determinada de acordo com a Norma NBR11941/2003 (ABNT, 2003a).

As taxas de secagem foram calculadas para cada corpo de prova, de acordo com a Equação 10.

$$T_s = \frac{M_r}{t \times A} \times 100 \quad (10)$$

em que

$T_s$  = taxa de secagem,  $\text{g.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$ ;

$M_r$  = massa de água removida, g;

$t$  = tempo de secagem, h;

$A$  = área superficial do corpo de prova,  $\text{cm}^2$ .

Foram determinadas as taxas de secagem médias para três intervalos: saída de água livre, que compreende a saída de água a partir da umidade inicial até 30%; saída parcial de água de adesão, a partir da umidade de 30% até 5% de umidade final e saída de água total, compreendendo a saída de água da umidade inicial a 5%. A umidade de 30% foi definida como a umidade no ponto de saturação das fibras (PSF), conforme Skaar (1972), que considera uma variação de 28% a 32% para este ponto de umidade e valor médio de 30%.

Ao final da secagem, os defeitos foram quantificados em todos os corpos de prova segundo as recomendações da NBR14806/2002 (ABNT, 2002), obtendo-se o índice médio de rachaduras, de arqueamento e de encurvamento. Para o índice de encanoamento seguiu-se o procedimento descrito na NBR15798/2010 (ABNT, 2010c).

O colapso foi avaliado com base na metodologia de Barbosa (2003). Os corpos de prova colapsados foram digitalizados individualmente e a área de topo com colapso de cada exemplar foi obtida no software AutoCAD® - Versão Educacional 2015. A área de topo normal foi obtida pelo produto das dimensões de largura e espessura de cada corpo de prova e, de posse dessas informações, o índice de colapso foi calculado (Equação 11).

$$IC = \frac{Ac}{An} \quad (11)$$

em que

IC = índice de colapso, adimensional;

Ac = área do corpo de prova com colapso, cm<sup>2</sup>;

An = área normal do corpo de prova, cm<sup>2</sup>.

A interpretação do índice de colapso revela que quanto mais a área de topo do corpo de prova com colapso se aproxima da área normal, menor é a deformação na madeira e menores são os efeitos do mesmo.

A classificação do índice de colapso para cada corpo de prova e a média por espécie foram adaptadas do trabalho de Barbosa (2003). Considerou-se colapso ausente para índice igual a 1,0, colapso leve para índices entre 0,95 e 1,0, colapso médio para índices entre 0,90 e 0,95 e colapso forte para índices inferiores a 0,90.

### **3.5 Caracterização anatômica da madeira**

A avaliação da estrutura anatômica da madeira foi realizada a partir de corpos de prova extraídos dos sarrafos de cada pranchão, utilizando-se 12

exemplares com anéis orientados. O corpo de prova foi seccionado em cubos com dimensões nominais de 2,0 x 2,0 x 2,0 cm, para a caracterização microscópica e para a análise do diâmetro das pontoações presentes nas paredes dos elementos vasculares e raiovasculares foram obtidos corpos de prova com dimensões de 0,5 x 0,5 x 0,5 cm.

A confecção dos corpos de prova, a obtenção dos cortes histológicos em micrótomo de deslize, a coloração e a montagem das lâminas seguiram as recomendações da Comissão Pan-Americana de Normas Técnicas - COPANT (1974) e Johansen (1940). Para o preparo do material macerado a partir de fragmentos de madeira, utilizou-se o método descrito no trabalho de Franklin (1945), adaptado por Berlyn e Miksche (1976).

A caracterização anatômica microscópica foi realizada de acordo com a metodologia estabelecida pela International Association of Wood Anatomists - IAWA (1989), com o auxílio de microscópio ótico com aumento de 100x, com câmera acoplada e conectado a computador, utilizando-se software de análise de imagens calibrado Image ProPlus.

Foram realizadas 30 medições para cada caractere anatômico e a média aritmética calculada por espécie. Os vasos foram quantificados quanto à frequência (número.mm<sup>-2</sup>), ao comprimento (μm) e ao diâmetro (μm) e os raios, quanto à frequência (número.mm<sup>-1</sup>), ao comprimento (μm) e à largura (μm). O comprimento (μm), a largura (μm) e o diâmetro do lume das fibras (μm) também foram obtidos. A espessura da parede celular foi calculada de acordo com a Equação 12.

$$EP = \frac{LF - DL}{2} \quad (12)$$

em que

EP = espessura da parede celular,  $\mu\text{m}$ ;

LF = largura da fibra,  $\mu\text{m}$ ;

DL = diâmetro do lume da fibra,  $\mu\text{m}$ .

Para a medição dos diâmetros das pontoações presentes nas paredes celulares dos elementos vasculares e raiovasculares utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura LEO EVO 40 XVP, pertencente ao Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural da UFLA. Anteriormente ao ensaio, os corpos de prova de cada espécie tiveram suas superfícies longitudinais radiais aplainadas em micrótomo de deslize e foram secos em estufa com circulação de ar, a 70 °C, por 1 hora, sendo mantidos em recipiente com sílica até o momento do mesmo. A superfície do corpo de prova foi recoberta com aproximadamente 20 nm de ouro em aparelho evaporador de ouro (Sputtering - Bal-Tec) e as imagens de microscopia eletrônica de varredura foram obtidas e mensuradas no equipamento LEO EVO 40 XVP, conforme ilustrado na Figura 8.



Figura 8 Observação das pontoações em microscópio eletrônico de varredura

### 3.6 Análise química da madeira

A caracterização química da madeira de cada espécie do estudo foi realizada com os corpos de prova produzidos a partir dos sarrafos de cada pranchão, utilizando-se 12 exemplares. Cada corpo de prova foi transformado em fragmentos de madeira, com o auxílio de formão e estilete, sendo posteriormente passados em moinho de facas tipo Willey, para a obtenção de serragem.

A serragem foi peneirada em um jogo de peneiras sobrepostas de 40 e 60 mesh, utilizando-se a alíquota que ficou retida na malha de 60 mesh. Após o peneiramento, a serragem foi acondicionada em câmara climática sob temperatura de  $(20\pm 3)$  °C e umidade relativa de  $(65\pm 5)\%$ , até a estabilização de sua massa.

As análises químicas foram realizadas de acordo com as recomendações das normas NBR14853/2010 (ABNT, 2010b) para o teor de extrativos totais, NBR7989/2010 (ABNT, 2010a) para lignina e NBR13999/2003 (ABNT, 2003b) para os componentes minerais. O teor de holocelulose (H) foi obtido por

diferença, utilizando-se a percentagem em relação aos demais componentes (Equação 13).

$$H=100 - ET - LI - CM \quad (13)$$

em que

H = teor de holocelulose, %;

ET = teor de extrativos totais, %;

LI = teor de lignina, %;

CM = teor de componentes minerais, %.

### **3.7 Aplicação de pré-tratamentos**

Os corpos de prova produzidos para os ensaios de secagem e os corpos de prova de permeabilidade impermeabilizados foram submetidos a três pré-tratamentos. Utilizou-se a imersão da madeira em água quente a 85 °C, o acondicionamento a 0 °C (baixas temperaturas) e o congelamento a -20 °C, com dois tempos de exposição para cada pré-tratamento, 12 e 24 horas. Foram utilizados 48 corpos de prova de permeabilidade e 24 corpos de prova de secagem por pré-tratamento e espécie, permanecendo um grupo com o mesmo número de corpos de prova não tratados (testemunha).

O pré-tratamento de imersão em água quente foi realizado em caixa térmica para cura de painéis de madeira, dotada de controle de temperatura e em sistema fechado (Figura 9).



Figura 9 Caixa térmica utilizada para o pré-tratamento da madeira em água quente a 85 °C

Para acondicionamento a 0 °C e o congelamento a -20 °C, foi utilizado um freezer industrial vertical com controle digital de temperatura e faixa de operação de +3 a -30 °C.

Seções de 12 corpos de prova para a caracterização anatômica e 12 para a análise química foram retiradas e pré-tratadas, a fim de se avaliar os efeitos dos tratamentos no diâmetro das pontoações e no teor de extrativos totais, cujos aumentos da permeabilidade e da taxa de secagem foram significativos.

### **3.8 Análise estatística**

A avaliação dos resultados obtidos foi realizada, inicialmente, por meio de análise descritiva para os corpos de prova controle, determinando-se os valores médios das propriedades químicas, anatômicas e físicas da madeira por espécie e os respectivos coeficientes de variação para as características avaliadas.

Para a verificação das relações entre as propriedades químicas e anatômicas com a permeabilidade da madeira, uma análise de correlação linear de Pearson foi realizada, a 5% de significância, em teste de t de student. A classificação do coeficiente de correlação (r) baseou-se no critério de Callegari-Jacques (2003) que prevê, em módulo, as seguintes condições: fraca correlação (baixa) para  $0 < r < 0,30$ ; moderada correlação para  $0,30 \leq r < 0,60$ ; correlação alta (forte) para  $0,60 \leq r < 0,9$ ; correlação muito forte para  $r \geq 0,90$  e correlação perfeita para  $r = 1,00$ .

As taxas e os defeitos de secagem médios por espécie foram calculados e submetidos à análise de variância, comparando-os por teste de médias de Scott-Knott, a 5% de significância.

O grau de relacionamento entre a permeabilidade da madeira e as taxas de secagem, e os índices de colapso também foram verificados por meio da correlação de Pearson, a 5% de significância, pelo teste de t de student.

Para a avaliação dos efeitos dos pré-tratamentos na permeabilidade e na secagem, realizou-se análise estatística considerando delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições, tendo como fatores pré-tratamentos, tempo de exposição e espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*

Os resultados obtidos para permeabilidade da madeira ao ar e à água, taxa de secagem e defeitos de secagem em função dos pré-tratamentos foram submetidos à análise de variância e comparados, pelo teste de médias de Scott-Knott, a 5% de significância.

Todos os procedimentos estatísticos foram feitos no software “R” versão 3.1.0<sup>®</sup>.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Propriedades das madeiras de *Eucalyptus grandis* e de *E. dunnii*

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios e os coeficientes de variação das propriedades químicas, anatômicas e físicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* e de *Eucalyptus dunnii*, com 37 anos de idade, sem a aplicação de pré-tratamentos.

Tabela 2 Valores médios das propriedades químicas, anatômicas e físicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* e de *Eucalyptus dunnii*

Propriedades	<i>Eucalyptus grandis</i>	<i>Eucalyptus dunnii</i>
Extrativos totais (%)	9,26 (16,6)	10,48 (18,9)
Lignina (%)	27,82 (1,9)	25,74 (1,63)
Holocelulose (%)	61,28 (2,8)	61,72 (3,1)
Componentes minerais (%)	1,64 (12,9)	2,06 (14,6)
Frequência de vasos (n°.mm <sup>-2</sup> )	13,00 (14,3)	16,10 (18,8)
Comprimento de vasos (µm)	241,60 (19,8)	219,30 (21,1)
Diâmetro de vasos (µm)	125,50 (13,6)	107,70 (14,7)
Frequência de raios (n°.mm <sup>-1</sup> )	13,83 (18,8)	14,19 (18,1)
Comprimento de raios (µm)	204,04 (23,4)	235,02 (17,0)
Largura de raios (µm)	14,41 (15,6)	12,16 (14,5)
Diâmetro de pontoações intervasculares (µm)	3,12 (20,6)	2,78 (23,1)
Diâmetro de pontoações raiovasculares (µm)	5,39 (14,8)	4,59 (15,6)
Comprimento de fibras (µm)	971,22 (14,1)	1003,75 (13,8)
Largura de fibras (µm)	18,51 (17,6)	20,64 (18,9)
Diâmetro do lume das fibras (µm)	7,69 (26,3)	7,03 (29,3)
Espessura da parede (µm)	5,70 (20,4)	6,48 (19,8)
Permeabilidade longitudinal ao ar (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-1</sup> .atm <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	69,24 (24,3)	65,88 (29,7)
Permeabilidade longitudinal à água (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-1</sup> .atm <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	1,47 (55,8)	1,33 (57,5)
Umidade inicial (%)	84,79 (15,6)	68,38 (17,8)
MTU (%)	102,97 (1,2)	82,25 (1,5)
Densidade básica g.cm <sup>-3</sup>	0,590 (6,2)	0,672 (6,9)

( ) = coeficiente de variação (%)

As madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii* não apresentaram fluxo de ar e de água nos ensaios de permeabilidade transversal às fibras, observação semelhante às relatadas por Baraúna (2010), para as espécies amazônicas faveira e amapá e por Silva (2007), para a madeira de *Pinus elliottii*. Estudando a permeabilidade da madeira de *Eucalyptus regnans*, Kininmonth (1971) mencionou a relação entre permeabilidade longitudinal e transversal, estimada em cerca de 10<sup>6</sup>, devido, principalmente, ao pequeno diâmetro de pontoações da madeira de *Eucalyptus*. Nasroun e Al-Shahrani (1998) consideraram, ainda, a espessura da parede celular como significativa na baixa magnitude da permeabilidade transversal às fibras e Siau (1971) cita que a permeabilidade transversal às fibras é extremamente baixa, com a limitação de um instrumento capaz de determinar um fluxo de baixas magnitudes na madeira.

#### 4.1.1 Propriedades químicas da madeira

Pela análise dos dados da Tabela 2, observa-se que o teor de extrativos presentes na madeira de *E. grandis* foi 10% inferior ao da madeira de *E. dunnii* e ambos são relativamente superiores aos descritos nos trabalhos de Latorraca (1996) e Silva et al. (2005). Avaliando as propriedades químicas da madeira de *E. grandis* aos 20 anos de idade, Silva et al. (2005) encontraram teor médio de extrativos totais de 6,1%, enquanto Latorraca (1996), para a madeira de *E. dunnii* com 14 anos, encontrou valor médio de 6,7%. No entanto, ressalta-se que, conforme Raymond (2000), com o aumento da idade e da cernificação, o teor de extrativos sofre um acréscimo, o que é válido para as madeiras deste estudo, as quais têm idade de 37 anos.

Para os teores de lignina, a madeira de *Eucalyptus grandis* apresentou média 8% superior à de *E. dunnii* e os valores também foram superiores aos reportados por Latorraca (1996) e Silva et al. (2005), para as madeiras de *E.*

*grandis* com 25 anos e de *E. dunnii* com 14 anos. Apesar de Raymond (2000) considerar que o teor de lignina decresce com aumento da idade, Silva et al. (2005) afirmam que o inverso também ocorre, com tendência crescente do teor em relação à idade.

Com relação ao teor de componentes minerais, a madeira de *E. grandis* apresentou o menor teor, 20% inferior à de *E. dunnii*. Os valores encontrados neste trabalho foram superiores aos relatados por Rocha (2011), que afirma que a quantidade de materiais de natureza inorgânica na madeira de *Eucalyptus* raramente ultrapassa 1,0%.

Já para o teor de holocelulose, as maiores médias foram observadas para a madeira de *E. dunnii*. Os resultados deste estudo para o teor de holocelulose das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii* foram inferiores aos encontrados por Pereira et al. (2000) e Silva et al. (2005), para as mesmas espécies com idades entre 10 e 25 anos, cujos valores foram de 75% e 67%, respectivamente. Silva et al. (2005) afirmam ainda que os teores de holocelulose são menores em árvores maduras em relação às mais jovens.

As correlações entre a permeabilidade e os componentes químicos das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii* estão apresentadas na Tabela 3, uma vez que, segundo Milota et al. (1995) e Siau (1984), estão diretamente relacionados.

Tabela 3 Correlações lineares entre as propriedades químicas das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii* com as permeabilidades longitudinais ao ar e à água

Espécie	Permeabilidade	Extrativos totais	Lignina	Componentes minerais	Holocelulose
<i>E. grandis</i>	K <sub>ar</sub>	-0,55*	0,16	-0,18	-0,08
	K <sub>água</sub>	-0,64*	0,15	-0,20	-0,18
<i>E. dunnii</i>	K <sub>ar</sub>	-0,57*	0,13	-0,11	-0,11
	K <sub>água</sub>	-0,67*	0,11	-0,12	-0,14

K = permeabilidade da madeira; \*significativo, a 5% de significância

Pela análise da Tabela 3, observa-se que as correlações obtidas para o teor de extrativos e a permeabilidade longitudinal ao ar e à água da madeira de *E. grandis* foram significativas, de moderadas a fortes, com valores superiores para o *E. dunnii*, condizentes com as observações de Milota et al. (1995). Madeiras com maior teor de extrativos apresentam maior correlação negativa com a permeabilidade, pois os mesmos tornam-se uma barreira ao fluxo, principalmente de líquidos, o que se comprova pelos dados da Tabela 2, em que a madeira de *E. dunnii* apresenta menor permeabilidade.

Com relação às correlações entre o teor de lignina e a permeabilidade ao ar e à água, estas foram baixas e não significativas. Apesar da baixa magnitude, Ramires (2010) considera que a lignina pode favorecer a difusão de um fluido, ao reduzir a capacidade dos sítios reativos que dificultam o fluxo, o que condiz com o maior valor de permeabilidade obtido para a madeira de *E. grandis*, que apresenta maior teor de lignina.

As correlações entre a permeabilidade da madeira e o teor de componentes minerais, assim como para o teor de holocelulose, também foram negativas, baixas e não significativas para ambas as espécies, não podendo afirmar o grau de relacionamento entre as variáveis, apesar de Baraúna (2010) e Yilgor et al. (2001) considerarem que redução no teor de hemiceluloses e acréscimo no teor de componentes minerais podem favorecer o fluxo.

#### **4.1.2 Caracteres anatômicos**

Pela análise dos dados da Tabela 2, observa-se que a frequência de vasos na madeira de *E. dunnii* foi superior à de *E. grandis*, apesar de o comprimento do elemento vascular e o diâmetro dos vasos serem menores. Estas observações estão de acordo com as reportadas por Rocha et al. (2004) para madeiras de

*Eucalyptus*, uma vez que menor diâmetro de vasos geralmente é acompanhado por maior frequência no lenho. Ahmed e Chun (2009) consideram, ainda, que o diâmetro de vasos tem maior relação com a permeabilidade que a frequência, tendência observada para a madeira de *E. grandis*, mais permeável que a de *E. dunnii* (Tabela 2).

De acordo com Baraúna (2010) e Monteiro (2014), a presença de tilos também tem influência no fluxo e na permeabilidade da madeira, o que foi observado na madeira de *E. dunnii* (Figura 10) de menor permeabilidade (Tabela 2) e não foi constatado para a madeira de *E. grandis*.



Figura 10 Presença de tilose nos vasos da madeira de *Eucalyptus dunnii*

Os resultados obtidos para as dimensões dos vasos e frequência, comprimento e largura de raios das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii* (Tabela 2) estão condizentes com os obtidos por Batista (2012) e Florsheim et al. (2009), que trabalharam com as mesmas espécies com idades de 18 e 7 anos, respectivamente. Ressalta-se, no entanto, que, segundo Ahmed e Chun (2009) e Siau (1971), os raios exercem maior influência na movimentação transversal de fluidos, o que não foi observado neste estudo.

A partir da análise das características das fibras, foi possível observar que a madeira de *E. grandis*, com exceção do diâmetro do lume das fibras, apresentou valores inferiores aos da madeira de *E. dunnii*, para as variáveis comprimento, largura e espessura da parede celular. Panshin e De Zeeuw (1980)

relatam que, em madeiras mais densas, a espessura da parede celular é superior, o que se comprova pelos dados da Tabela 2, para a madeira de *E. dunnii*, que apresentou maior densidade básica.

Os resultados encontrados para a madeira de *E. grandis* (Tabela 2) foram relativamente inferiores aos valores obtidos por Alzate (2004) e Batista (2012) que também trabalharam com *E. grandis* aos 8 e 18 anos, respectivamente. Estes autores encontraram comprimentos de fibras médios de 1.030,00 a 1.120,00  $\mu\text{m}$ , larguras de 20,99 a 21,50  $\mu\text{m}$ , diâmetros dos lumes de 9,60 a 12,80  $\mu\text{m}$  e espessuras de parede de até 7,00  $\mu\text{m}$ .

Para a madeira de *E. dunnii* (Tabela 2), apenas os resultados para comprimento das fibras e espessura da parede foram distintos e superiores aos descritos por Florsheim et al. (2009), que obtiveram médias de 860,00 e 4,33  $\mu\text{m}$ , para as duas características, respectivamente. Para o diâmetro do lume, estes autores encontraram média de 8,38  $\mu\text{m}$ , superior ao apresentado na Tabela 2.

Analisando-se o diâmetro das pontoações intervasculares e raiovasculares (Tabela 2), constata-se que a madeira de *E. dunnii* apresentou valores 10% e 15% inferiores ao da madeira de *E. grandis*, respectivamente.

Os diâmetros de pontoações intervasculares e raiovasculares obtidos neste estudo (Tabela 2) estão próximos dos reportados por Alzate (2004) que encontrou, para madeira de *Eucalyptus*, pontoações raiovasculares com diâmetros de 4,45 a 6,25  $\mu\text{m}$  e Lopes (2013) que, trabalhando com diferentes genótipos de *Eucalyptus* sp., obteve para as intervasculares valores entre 3,00 e 6,10  $\mu\text{m}$ .

Com relação às correlações entre a estrutura anatômica e a permeabilidade da madeira, os resultados para as madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii* são apresentados na Tabela 4. Os resultados foram significativos, a 5% de significância, para diâmetro dos vasos, comprimento das fibras e diâmetro das pontoações, em consonância com as observações de Ahmed e Chun (2011).

Tabela 4 Correlações lineares entre a estrutura anatômica e as permeabilidades longitudinais ao ar e à água das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii*

Espécie	K	DV	CF	DP	FV	CV	FR	CR	LR	LF	DL	EP
<i>E. grandis</i>	K <sub>ar</sub>	0,37*	0,27*	0,48*	-0,11	0,16	-0,08	0,15	0,07	0,13	-0,06	-0,16
	K <sub>água</sub>	0,33*	0,24*	0,48*	-0,11	0,18	-0,12	0,17	0,09	0,13	-0,07	-0,17
<i>E. dunnii</i>	K <sub>ar</sub>	0,32*	0,25*	0,45*	-0,09	0,14	-0,11	0,14	0,07	0,15	-0,04	-0,20
	K <sub>água</sub>	0,30*	0,25*	0,47*	-0,10	0,13	-0,13	0,19	0,07	0,16	-0,07	-0,19

K= permeabilidade da madeira; DV = diâmetro de vasos; CF = comprimento de fibras; DP = diâmetro de pontoações; FV= frequência de vasos; CV = comprimento de vasos; FR = frequência de raios; CR = comprimento de raios; LR= largura de raios; LF = largura de fibras; DL = diâmetro do lume; EP = espessura da parede celular \*significativo, a 5% de significância

Pela análise dos dados da Tabela 4, verifica-se que as correlações entre o diâmetro dos vasos e a permeabilidade ao ar e à água para o *E. grandis* e o *E. dunnii* foram moderadas. Estas observações condizem com as de Nasroun e Al-Shahrani (1998) que afirmam que o diâmetro dos vasos tem correlação significativa com a permeabilidade longitudinal da madeira de *Eucalyptus*. Monteiro (2014) também obteve, para a madeira de *Eucalyptus*, correlação significativa e moderada entre fluxo longitudinal de água e diâmetro do elemento vascular, em torno de 0,50.

Para o comprimento das fibras das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii*, apesar de significativas, as correlações foram baixas, em média de 0,25 (Tabela 4). Segundo Nasroun e Al-Shahrani (1998), o comprimento das fibras tem correlação moderada com a permeabilidade longitudinal da madeira, o que não foi observado neste trabalho (Tabela 4). Por outro lado, Baraúna (2010) também encontrou baixas correlações entre permeabilidade e comprimento das fibras para madeiras de amapá e faveira, em torno de 0,20.

As correlações entre a permeabilidade ao ar e à água e o diâmetro das pontoações para as madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii* foram moderadas, em média de 0,47 (Tabela 4), corroborando as observações de Choat et al. (2008) que consideram uma relação direta entre permeabilidade e o diâmetro da pontoação. Ahmed e Chun (2011) apontam uma forte influência do diâmetro das pontoações no fluxo de líquidos entre uma célula e outra e na permeabilidade da madeira o que, possivelmente, explica a maior permeabilidade ao ar e à água da madeira de *E. grandis* (Tabela 2). As correlações encontradas neste estudo foram superiores às constatadas por Monteiro (2014) que encontrou valor médio de 0,20.

Para as características frequência e comprimento do elemento vascular, frequência, comprimento e largura de raios, largura da fibra, diâmetro do lume e espessura da parede celular, não houve significância e, de forma geral, as

correlações com permeabilidade foram fracas (Tabela 4). Monteiro (2014) não encontrou correlações significativas ente fluxo longitudinal de água e variáveis anatômicas relacionadas ao raio para a madeira de *Eucalyptus*, o que coincide com baixas correlações encontradas neste estudo (Tabela 4), assim como Baraúna (2010), que não obteve, para madeira de faveira, correlações significativas para frequência de vasos, largura das fibras, diâmetro do lume das fibras e espessura da parede celular.

#### 4.1.3 Propriedades físicas

Para os valores de máximo teor de umidade (MTU) e de densidade básica apresentados na Tabela 2, observaram-se maior densidade e menor MTU para a madeira de *E. dunnii*, de acordo com as observações de Skaar (1972) que relatou relação inversa entre as duas propriedades, em função do menor percentual de espaços vazios que podem ser preenchidos por água em madeiras mais densas.

O menor coeficiente de variação obtido para umidade inicial da madeira de *E. grandis* indica menor variabilidade no lenho, principalmente quanto à distribuição de umidade. Vermaas (1995) considera que, em madeiras mais permeáveis, o coeficiente de variação de umidade é inferior, fato este perceptível ao comparar a permeabilidade das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii* (Tabela 2).

Para a densidade básica, os valores encontrados foram ligeiramente superiores aos determinados por Ciniglio (1998), para madeira de *E. grandis* com idade de 18 anos e por Batista et al. (2010), para a madeira de *E. dunnii* com 17 anos, cujas observações foram, respectivamente, de 0,570 e 0,650 g.cm<sup>-3</sup>.

Siau (1971) relata que, de forma geral, a permeabilidade da madeira é inversamente proporcional à sua densidade básica. As correlações entre a permeabilidade ao ar e à água e a densidade básica das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii* são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 Correlações lineares entre a densidade básica e as permeabilidades longitudinais ao ar e à água das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii*

Espécie	Permeabilidade	Densidade básica
<i>E. grandis</i>	K <sub>ar</sub>	-0,18 <sup>ns</sup>
	K <sub>água</sub>	-0,20 <sup>ns</sup>
<i>E. dunnii</i>	K <sub>ar</sub>	-0,16 <sup>ns</sup>
	K <sub>água</sub>	-0,19 <sup>ns</sup>

K = permeabilidade da madeira; \*ns = não significativo, a 5% de significância

Pela análise dos dados da Tabela 5, constata-se relação inversa entre permeabilidade e densidade, porém, de baixa magnitude e não significativa para ambas as madeiras. Os elevados coeficientes de variação da permeabilidade das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii* podem ter influenciado as correlações, uma vez que, segundo Taghiyari et al. (2010), a elevada variância na permeabilidade é característica natural de madeiras maciças.

Em relação aos valores de permeabilidade longitudinal média ao ar e à água da madeira de *E. grandis*, estes foram superiores em 5% e 10%, respectivamente, aos de *E. dunnii*, em função, principalmente, de suas propriedades químicas e anatômicas e dos menores coeficientes de variação (Tabela 2).

Houve diferenças entre a permeabilidade da madeira à água e ao ar (Tabela 2), uma vez que, segundo Siau (1971), a viscosidade da água é superior à do ar atmosférico, em torno de 55 vezes maior, à temperatura de 20 °C. Além disso, a água pode se ligar à madeira em função da higroscopicidade do material, diminuindo a vazão do fluido.

Com base nos valores de permeabilidade à água e ao ar das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii* (Tabela 2), a relação obtida entre estas, para ambas as espécies, foi de 50, valor próximo à relação entre as viscosidades da água e do ar. Silva et al. (2010) obtiveram relação igual a 59 para madeira de *Corymbia citriodora*.

Os resultados encontrados para a permeabilidade média, neste estudo (Tabela 2), foram inferiores aos relatados por Pinheiro (2013) para madeira de *Eucalyptus urophylla*, com permeabilidade média ao ar de 108,49  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-1}.\text{atm}^{-1}.\text{s}^{-1}$ . Porém, estão próximos aos de Baraúna et al. (2015) que obtiveram, para a espécie folhosa amazônica amapá, permeabilidades longitudinais ao ar e à água iguais a 64,53  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-1}.\text{atm}^{-1}.\text{s}^{-1}$  e 2,10  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-1}.\text{atm}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , respectivamente.

#### 4.2 Taxa de secagem e defeitos de secagem

Na Tabela 6 apresentam-se os resultados obtidos para a taxa de secagem e os defeitos de secagem das madeiras de *Eucalyptus grandis* e de *Eucalyptus dunnii* com 37 anos de idade.

Tabela 6 Taxas de secagem e defeitos de secagem médios das madeiras de *Eucalyptus grandis* e de *Eucalyptus dunnii*

Espécie	TAL $\text{g.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$	TAA $\text{g.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$	TAT $\text{g.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$	Enc. (%)	Arq. (%)	Encan. (%)	Rach. (%)	IC
<i>E. grandis</i>	0,0325a	0,0062a	0,0126a	1,68a	1,29a	2,02a	8,29a	0,85a
<i>E. dunnii</i>	0,0288b	0,0059b	0,0115b	2,40b	1,70a	2,22a	14,24b	0,81b

\*TAL = taxa de saída de água livre; TAA = taxa de saída de água de adesão; TAT = taxa de saída de água total Enc. = encurvamento; Arq.= arqueamento; Encan. = encanoamento; Rach = índice de rachaduras; IC = índice de colapso; médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, a 5% de significância

As taxas de secagem e os índices de defeitos das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii* foram distintos (Tabela 6), com as maiores taxas e os menores índices de defeitos para a madeira de *E. grandis*, mais permeável que a de *E. dunnii* (Tabela 2).

Segundo Calonego e Severo (2004) e Vermaas (1995), as madeiras do gênero *Eucalyptus* apresentam secagem lenta e complexa devido, principalmente, à baixa permeabilidade, a qual causa maior suscetibilidade aos defeitos ocorridos no processo de secagem.

No entanto, ressalta-se que as causas dos defeitos de secagem não estão relacionadas apenas à permeabilidade da madeira, mas também às diferenças de contração, irregularidades da grã, elevados gradientes de umidade, ambiente, manifestação de tensões de crescimento, interação genótipo e ambiente e genética do material, conforme Shacht et al. (1998) que obtiveram índices de herdabilidade superiores a 0,8 (fortemente herdáveis) para rachaduras e flechas dos empenamentos da madeira de *E. urophylla*.

Os maiores índices de defeitos da madeira de *E. dunnii* em relação ao *E. grandis*, além das características anatômicas e de permeabilidade, podem estar relacionados à densidade da madeira (Tabela 2). Hart (1966) afirma que a densidade básica tem relação direta com a incidência de defeitos de secagem inerentes à movimentação dimensional da madeira, tais como empenamentos e rachaduras, uma vez que maiores densidades dificultam a movimentação de água, principalmente abaixo do ponto de saturação das fibras (água adsorvida).

Verifica-se, pelos dados da Tabela 6, que apenas os índices de encurvamento, de rachaduras e de colapso foram estatisticamente diferentes entre as madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii*, com maiores valores observados para este último. Klitzke e Batista (2010) já haviam constatado maiores índices de rachadura e de colapso na madeira de *E. dunnii*, quando comparada à de *E. grandis*, uma vez que, segundo Hart (1966), em madeiras menos densas e mais

permeáveis, a secagem é favorecida e, normalmente, conduz a menor índice de defeitos.

De forma geral, os resultados dos defeitos de secagem (Tabela 6) foram inferiores aos obtidos por Rezende et al. (2015) que, trabalhando com tábuas de *E. grandis* com idade de 25 anos, plantado na mesma região de estudo, encontraram valores médios para empenamentos inferiores a 1,0% e colapso forte (0,83). Para os índices de rachadura (Tabela 6), os resultados foram superiores aos obtidos por Oliveira (2003) para a madeira de *E. grandis* com a mesma idade, cuja média foi de 4,0%.

Os índices de colapso, tanto para a madeira de *E. grandis* quanto para a de *E. dunnii* (Tabela 6), são considerados fortes de acordo com a classificação de Barbosa et al. (2005). Choong et al. (1999) e Miao et al. (2010) relatam que a permeabilidade no lenho de *Eucalyptus* é baixa e muito variável, influenciando diretamente nos índices deste defeito.

Quanto aos resultados das taxas de secagem (Tabela 6), observa-se que a madeira de *E. grandis*, de maior permeabilidade (Tabela 2), foi a que apresentou maiores perdas de massa de água, em média, 10% superior.

Os valores determinados para taxa de secagem das madeiras de *E. grandis* com umidade inicial de 82% e de *E. dunnii* com 66% foram ligeiramente inferiores aos reportados na literatura, possivelmente em função das diferenças de umidade inicial, idade, espécie trabalhada e área de evaporação considerada. Para madeira de *Eucalyptus*, Barbosa et al. (2005), Ciniglio (1998), Klitzke e Batista (2010) e Oliveira et al. (2003) obtiveram taxas de saída de água livre entre 0,0310 e 0,0350 g.cm<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>, enquanto para água de adesão os valores variaram de 0,0080 e 0,0115 g.cm<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>. Já para a taxa total, os mesmos autores encontraram resultados de 0,0130 a 0,0190 g.cm<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>.

As correlações entre as taxas de secagem e a permeabilidade ao ar e à água das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii*, bem como para o índice de colapso, são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 Correlações lineares das taxas de secagem e do índice de colapso com as permeabilidades ao ar e à água das madeiras de *Eucalyptus grandis* e de *Eucalyptus dunnii*

Espécie	Permeabilidade (K)	TAL g.cm <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup>	TAA g.cm <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup>	TAT g.cm <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup>	IC
<i>E. grandis</i>	K <sub>ar</sub>	0,58*	0,53*	0,49*	0,51*
	K <sub>água</sub>	0,59*	0,53*	0,51*	0,54*
<i>E. dunnii</i>	K <sub>ar</sub>	0,53*	0,56*	0,52*	0,58*
	K <sub>água</sub>	0,53*	0,58*	0,51*	0,59*

\*TAL = taxa de saída de água livre; TAA = taxa de saída de água de adesão; TAT = taxa de saída de água total IC = índice de colapso; \*significativo, a 5% de significância

Para todas as variáveis da Tabela 7, as correlações foram significativas, demonstrando um moderado grau de relacionamento entre a permeabilidade e as taxas de secagem e também com os índices de colapso. No entanto, Bariska (1992) e Siau (1971) consideram que a permeabilidade, dependente da composição química e anatômica da madeira, tem alta correlação com a taxa de secagem e com os índices de colapso, o que explica o maior valor desta propriedade física e menor índice de colapso para madeira de *E. grandis* em relação à de *E. dunnii*.

#### 4.3 Efeitos dos pré-tratamentos na permeabilidade da madeira

Os resultados médios de permeabilidade ao ar e à água destilada das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii* submetidas aos pré-tratamentos de imersão em água quente a 85°C, acondicionamento a baixas temperaturas (0°C) e de congelamento a -20 °C, durante 12 e 24 horas, são apresentados na Tabela 8.

As interações entre os fatores não foram significativas, a 5% de significância, pela análise de variância.

Tabela 8 Permeabilidade longitudinal ao ar ( $K_{ar}$ ) e à água ( $K_{água}$ ) das madeiras de *Eucalyptus grandis* e de *Eucalyptus dunnii* submetidas aos diferentes pré-tratamentos

Espécie	K cm <sup>3</sup> .cm <sup>-1</sup> .atm <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	Condição/pré-tratamento						
		Controle	0 °C 12h	0 °C 24h	-20 °C 12h	-20 °C 24h	85 °C 12h	85 °C 24h
<i>E. grandis</i>	$K_{ar}$	69,24a	69,72a	70,11a	70,81a	71,95a	81,56b	82,70b
	$K_{água}$	1,47a	1,49a	1,50a	1,53a	1,54a	1,61b	1,62b
<i>E. dunnii</i>	$K_{ar}$	65,88A	65,96A	65,99A	66,91A	68,05A	75,35B	77,31B
	$K_{água}$	1,33A	1,34A	1,34A	1,37A	1,37A	1,43B	1,45B

\*Em cada linha, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância

Observa-se, pelos dados da Tabela 8, que as permeabilidades ao ar e à água das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii* foram distintas, com efeitos significativos apenas do pré-tratamento em água quente a 85 °C, nos tempos 12 e 24 horas de exposição e melhores resultados para a madeira de *E. grandis*.

Os aumentos na permeabilidade ao ar e à água para os pré-tratamentos de congelamento e de condicionamento a baixas temperaturas ocorreram, mas não foram significativos, não diferindo, portanto, dos valores apresentados pela testemunha.

Ilic (1999) e Oliveira et al. (2003) não encontraram efeitos significativos do pré-congelamento a temperaturas de -15 °C e -20 °C e tempos de 24 e 72 horas na velocidade de secagem da madeira de *Eucalyptus*, devido, principalmente, à redução do diâmetro dos capilares e à presença de cristais de gelo que dificultaram o fluxo de água.

Não foi possível constatar, neste estudo, o efeito da contração dos diâmetros de pontoações e de capilares da madeira por meio da microscopia eletrônica de varredura, uma vez que a própria preparação do corpo de prova para a visualização no microscópio requer uma secagem a 70 °C, pressupondo-se que os efeitos do congelamento à madeira podem ser momentâneos.

Mesmo não havendo diferença estatística significativa entre as permeabilidades da madeira acondicionada a 0 °C e congelada a -20 °C (Tabela 8), possivelmente a madeira acondicionada apresentou comportamento transitório entre a testemunha e a madeira congelada, uma vez que, nesta condição (0 °C), pode-se não atingir o ponto de congelamento. Angell et al. (2008) já haviam reportado tal fato, sendo que, em situações confinadas, como a madeira, por exemplo, mesmo próximo de 0 °C, a água pode não mudar de estado físico, em função da estabilidade de suas ligações.

Tanto para a madeira de *E. grandis* quanto para a de *E. dunnii*, os acréscimos em comparação à testemunha para permeabilidade ao ar e à água em

função do acondicionamento a 0 °C e do congelamento a -20 °C, por 12 e 24 horas, foram baixos, de forma geral inferiores a 5,0%.

Já o pré-tratamento da madeira em água quente a 85 °C foi o que mais se destacou pelo aumento da permeabilidade ao ar e à água, nas madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii*, não havendo diferença estatística entre tempos de exposição de 12 e 24 horas. Para madeira de *E. grandis*, os ganhos nas permeabilidades ao ar e à água em relação à testemunha com a imersão em água quente foram, em média, de 20% e 10%, respectivamente, enquanto, para *E. dunnii*, esses aumentos foram de 15% e 8%.

Compreende-se que a imersão em água quente foi benéfica para o aumento da permeabilidade da madeira, estando de acordo com as explicações de Batista (2012), Choong et al. (1999), Diaz-Vaz et al. (1998), Glossop (1994) e Haslett e Kininmonth (1986), que relataram favorecimento do fluxo de água, à remoção de extrativos, aos aumentos na velocidade de secagem e, conseqüentemente, da permeabilidade com o pré-tratamento em questão.

As possíveis explicações para o aumento da permeabilidade da madeira após o pré-tratamento de imersão em água quente (Tabela 8) baseiam-se na redução do teor de extrativos totais e os efeitos da temperatura no diâmetro das pontoações intervasculares.

A redução percentual do teor de extrativos totais em relação à testemunha na madeira de *E. grandis* foi de 19,1%, para o tempo de exposição em água quente de 12 horas e de 21,9% para o tempo de 24 horas, enquanto na madeira de *E. dunnii* estas reduções foram de 18,4% e 20,3%, respectivamente. Conforme Trugilho et al. (2002), a água quente é capaz de solubilizar sais inorgânicos, açúcares, frações de polissacarídeos e taninos hidrolisáveis, entre outros compostos da madeira, contribuindo para a redução do bloqueio ao fluxo de água imposto por estas substâncias.

Com relação aos diâmetros de pontoações, na madeira de *E. grandis* houve uma dilatação média de 5,3% com o pré-tratamento, enquanto na madeira de *E. dunnii* este aumento foi de 4,1%. Ressalta-se que a dilatação do diâmetro das pontoações foi baixa em relação aos aumentos de permeabilidade, porém, a preparação do corpo de prova pré-tratado para visualização no microscópio requer uma secagem a 70 °C, o que pode ter afetado essa magnitude, além de que os efeitos da água quente na madeira podem se manifestar de forma mais pronunciada no momento do tratamento.

#### **4.4 Efeitos dos pré-tratamentos na taxa e defeitos de secagem da madeira**

As taxas de secagem e os índices de defeitos médios das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii* submetidas aos pré-tratamentos de imersão em água quente a 85 °C, acondicionamento a baixas temperaturas (0 °C) e congelamento a -20 °C, durante 12 e 24 horas, são apresentados na Tabela 9.

Tanto para as taxas de secagem quanto para os índices de arqueamento, rachaduras, encurvamento, encanoamento e colapso houve diferenças estatísticas entre as madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii*, a 5% de significância, porém, as interações não se mostraram significativas devido à grande variabilidade dos dados. As taxas de secagem e os defeitos em função dos diferentes pré-tratamentos apresentaram diferentes padrões, pelo teste de Scott-Knott, a 5% de significância.

Tabela 9 Taxas de secagem e índices de defeitos das madeiras de *Eucalyptus grandis* e de *Eucalyptus dunnii* sem pré-tratamento e submetidas aos diferentes pré-tratamentos

<i>Eucalyptus grandis</i>							
Taxa/ Defeitos	Testemunha	0 °C 12h	0 °C 24h	-20 °C 12h	-20 °C 24h	85 °C 12h	85 °C 24h
TAL (g.cm <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	0,0325f	0,0332f	0,0340e	0,0376d	0,0415c	0,0475b	0,0508a
TAA (g.cm <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	0,0062d	0,0066d	0,0070c	0,0080b	0,0088b	0,0096a	0,0100a
TAT (g.cm <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	0,0126e	0,0132e	0,0140d	0,0144c	0,0147c	0,0176b	0,0197a
Enc. (%)	1,68a	1,63a	1,63a	1,60a	1,63a	1,48b	1,39c
Arq. (%)	1,29a	0,74c	0,67c	0,57d	0,51e	1,01b	0,97b
Encan. (%)	2,02a	1,19b	1,21b	1,12c	1,14c	1,11c	1,09c
Rach. (%)	8,29a	3,93c	4,16c	5,06b	5,26b	3,61d	3,56d
IC	0,85c	0,85c	0,86c	0,88c	0,91b	0,95a	0,96a
<i>Eucalyptus dunnii</i>							
Taxa/ Defeitos	Testemunha	0 °C 12h	0 °C 24h	-20 °C 12h	-20 °C 24h	85 °C 12h	85 °C 24h
TAL (g.cm <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	0,0288e	0,0304e	0,0325d	0,0361c	0,0371c	0,0400b	0,0418a
TAA (g.cm <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	0,0059d	0,0062d	0,0067c	0,0069c	0,0072b	0,0083a	0,0086a
TAT (g.cm <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	0,0115f	0,0126e	0,0133d	0,0140c	0,0142c	0,0164b	0,0177a
Enc. (%)	2,40a	1,84c	1,96b	1,79c	1,69d	1,57e	1,55e
Arq. (%)	1,70a	0,95d	0,90d	1,21b	1,03c	1,06c	0,83e
Encan. (%)	2,22a	1,35c	1,41c	1,90b	1,84b	1,31d	1,27d
Rach. (%)	14,24a	5,88b	5,78b	6,22b	6,93c	4,61d	3,82d
IC	0,81c	0,81c	0,81c	0,82c	0,85b	0,91a	0,93a

\*TAL = taxa de saída de água livre; TAA = taxa de saída de água de adesão; TAT = taxa de saída de água total; Enc. = encurvamento; Arq.= arqueamento; Encan. = encanoamento; Rach = índice de rachaduras; IC = índice de colapso; em cada linha, médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, a 5% de significância

Na Tabela 9, observa-se que a madeira de *E. grandis* apresentou maiores taxas de secagem e menores índices de defeitos que a madeira de *E. dunnii* com a aplicação dos pré-tratamentos.

De forma geral, os piores efeitos na taxa de secagem e nos defeitos de secagem foram observados para o pré-tratamento de acondicionamento a baixas temperaturas durante 12 horas, enquanto o maior desempenho ocorreu com a imersão das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii* em água quente, durante 24 horas.

Com exceção do índice de arqueamento na madeira de *E. grandis*, cujos índices foram reduzidos em maior proporção para a madeira pré-congelada, todos os outros defeitos foram sensivelmente reduzidos com a imersão em água quente, com destaque para a redução média das rachaduras em 70% para o *E. dunnii* e 60% no *E. grandis*. Os resultados obtidos para o índice de rachaduras da madeira pré-tratada estão próximos aos encontrados por Oliveira (2003) que, para a madeira de *E. grandis*, constatou índices médios de 5% após imersão da madeira em água quente.

Para os índices de encurvamento e de encanoamento, as reduções com a imersão em água quente foram de 15% e 45%, para o *E. grandis*, respectivamente, e de 35% e 40%, para o *E. dunnii*.

Os índices de colapso foram reduzidos em maior intensidade nas madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii* pré-tratadas com imersão em água quente durante 24 horas, em torno de 15%. Estes valores estão próximos aos de Rezende et al. (2015) para a madeira de *E. grandis* submetida a vapor aquecido e saturado durante 3 horas, cuja técnica reduziu em 12% o índice de colapso.

As madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii* submetidas ao pré-congelamento apresentaram maiores índices de rachadura em relação aos outros pré-tratamentos. Giovanella e Muniz (2010) justificaram o maior índice de

rachaduras na madeira pré-congelada, em função do aumento do volume da água no interior da madeira e da pressão interna nos tecidos.

No entanto, os índices de colapso da madeira pré-congelada deste estudo foram reduzidos em torno de 6%, para o *E. dunnii* e o *E. grandis*, diferente de Ilic (1999), que constatou redução média de 36% no índice de colapso da madeira de *E. regnans* pré-tratada à temperatura de -20 °C, por 72 horas.

O pré-tratamento de imersão em água quente por 24 horas apresentou melhores resultados, já que foi o responsável pelo maior incremento na permeabilidade da madeira, acompanhado de efeitos na dilatação de pontoações e redução do teor de extrativos, condizentes com os relatos de Choong et al. (1999) e Zhang e Cai (2008).

Pode-se destacar também que há o efeito da água aquecida a 85 °C na estrutura da madeira durante o pré-tratamento que, segundo Aguiar e Perré (2005), é responsável por torná-la mais amolecida, permitindo, assim, alívio das tensões internas e redução dos níveis dos defeitos de secagem.

Além disso, Keey, Langrish e Walker (2000) afirmam que a redução do teor de extrativos que dificultam o fluxo de água na madeira é acompanhada de uma diminuição do índice de colapso, fato este observado neste estudo (Tabela 9).

Ponce (1995) considera que, em madeiras pouco permeáveis e com grande variabilidade da permeabilidade no lenho, como é o caso do *E. grandis* e do *E. dunnii* deste estudo (Tabela 2), o colapso é frequente e forte. Quando há perda de umidade, altera-se a pressão interna nos capilares e a tensão capilar supera a resistência das paredes celulares, gerando um esmagamento interno das fibras. Dessa forma, os aumentos na permeabilidade e o favorecimento do fluxo de água livre com o pré-tratamento de imersão em água quente podem reduzir essa variabilidade e os índices de colapso da madeira (Tabela 9).

Para as taxas de secagem (Tabela 9), observou-se que os menores incrementos em relação à testemunha ocorreram para a madeira acondicionada a

baixas temperaturas por 12 horas, em média de 5% para as madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii*. Para o tempo de 24 horas, os acréscimos médios foram de 10% e 15%, respectivamente.

O congelamento da madeira resultou em comportamento intermediário entre os pré-tratamentos avaliados, com aumentos médios na madeira de *E. grandis* de 20% para a saída de água livre, 35% para a saída de água de adesão e 15% para a saída de água total. Na madeira de *E. dunnii*, os aumentos foram, em média, de 20% para todos os intervalos de taxa de secagem. Estes resultados foram superiores aos obtidos por Glossop (1994) que encontrou, para as madeiras de *E. marginata* e de *E. diversicolor* submetidas ao pré-congelamento (-20°C), taxas 10% maiores que da testemunha.

O pré-tratamento de imersão em água quente promoveu os maiores aumentos em relação à testemunha, com destaque para o tempo de exposição de 24 horas, que promoveu aumentos nas taxas de secagem em torno de 55% para a madeira de *E. grandis* e, para a madeira de *E. dunnii*, o aumento médio foi de 50%. Ressalta-se, no entanto, que não houve diferença estatística entre saída de água de adesão para a imersão durante 12 e 24 horas, apesar da diferença numérica entre ambas.

Os resultados obtidos para taxa de secagem das madeiras pré-tratadas em água quente estão em conformidade com os reportados por Oliveira et al. (2003) que observaram aumento de 52% em relação à testemunha com a imersão da madeira de *Eucalyptus grandis* em água quente a 90 °C, durante 24 horas. Apesar da proximidade dos valores, Sayar e Tarmian (2013) revelam que são comuns observações contraditórias em estudos da madeira submetida a diferentes pré-tratamentos, uma vez que seus efeitos no movimento de fluidos, na permeabilidade e no coeficiente de difusão são influenciados pela espécie, a estrutura porosa do material, a constituição química e as condições dos tratamentos.

## 5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados neste trabalho, pode-se concluir que:

- a) as permeabilidades longitudinais ao ar e à água da madeira de *E. grandis* foram, em média, 5% e 10% superiores às de *E. dunnii*, respectivamente e ambas as espécies não apresentaram fluxo nos ensaios de permeabilidade transversal às fibras;
- b) a madeira de *E. grandis* apresentou menores valores de densidade básica, teor de extrativos e comprimento de fibras e maiores diâmetros de vasos e de pontoações que a de *E. dunnii*;
- c) as maiores taxas de secagem foram obtidas para a madeira de *E. grandis*, em média 10% superiores para as saídas de água livre e total e 5% para a saída de água de adesão em relação à de *E. dunnii*;
- d) a madeira de *E. grandis* apresentou menores índices de defeitos que a de *E. dunnii*, em torno de 40% inferior para encurvamento, 30% para arqueamento, 70% para rachaduras e 5% para intensidade do colapso;
- e) os pré-tratamentos de acondicionamento a baixas temperaturas e de congelamento não tiveram efeitos significativos nas permeabilidades ao ar e à água das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii*;
- f) a imersão em água quente promoveu os maiores aumentos na permeabilidade ao ar e à água da madeira de *E. grandis*, em

- média de 20% e 10%, enquanto para o *E. dunnii*, os acréscimos foram de 15% e 9%, respectivamente;
- g) as taxas de secagem das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii* aumentaram, em média, 55% e 50%, com a imersão em água quente, respectivamente;
  - h) os menores incrementos nas taxas de secagem ocorreram para a madeira acondicionada a baixas temperaturas, com acréscimo em torno de 10%;
  - i) o congelamento promoveu aumentos intermediários na taxa de secagem entre os pré-tratamentos avaliados, com aumentos médios de 25% para *E. grandis* e 20% para *E. dunnii*, enquanto os índices de rachaduras foram, em média, 35% superiores aos dos demais pré-tratamentos;
  - j) o pré-tratamento de imersão em água quente por 24 horas foi responsável pela maior redução dos defeitos de secagem, com destaque para a redução dos índices de rachaduras e de colapso das madeiras de *E. grandis* e de *E. dunnii*, em média, 65% e 15%, respectivamente;
  - k) de forma geral, a madeira de *E. grandis* foi mais permeável que a de *E. dunnii* e apresentou as maiores taxas de secagem e os menores índices de defeitos.

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, O. J. R.; PERRÉ, P. **Wood accelerating drying process based on its rheological properties**. US n. 6910284B2, 28 June 2005.

AHMED, S. A.; CHUN, S. K. Observation of liquid permeability related to anatomical characteristics in *Samanea saman*. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, Ankara, v. 33, n. 2, p. 155-163, 2009.

AHMED, S. A.; CHUN, S. K. Permeability of *Tectona grandis* L. as affected by wood structure. **Wood Science and Technology**, Zurich, v. 45, n. 3, p. 487-500, Aug. 2011.

ALEXIOU, P. N. et al. Effect of pre-steaming on drying rate wood anatomy and shrinkage of regrowth *Eucalyptus pilularis*. **Wood Science and Technology**, Zurich, v. 24, n. 1, p. 103-110, 1990.

ALZATE, S. B. A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. Saligna* e *E. Grandis x urophylla***. 2004. 133 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2004.

ANGELL, C. A. et al. Insights into phases of liquid water from study of it unusual glass-forming process. **Science**, New York, v. 319, n. 5863, p. 582-588, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989**: pasta celulósica e madeira: determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2010a. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003a. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999**: papel, cartão, pastas celulósicas e madeira: determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C. Rio de Janeiro, 2003b. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14806**: madeira serrada de eucalipto: requisitos. Rio de Janeiro, 2002. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**: madeira: determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010b. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15798**: pisos de madeira: terminologia. Rio de Janeiro, 2010c. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF**: ano base 2012. Brasília, 2013. 147 p.

AWOYEMI, L. Influence of prefreezing on the mechanical response of wood to high temperature drying. **Journal of the Institute of Wood Science**, Philadelphia, v. 19, n. 1, p. 31-34, 2009.

BABINSKI, L. Investigations on pre-treatment prior to freeze-drying of archaeological pine wood with abnormal shrinkage anisotropy. **Journal of Archaeological Science**, New York, v. 38, n. 7, p. 1709-1715, July 2011.

BARAÚNA, E. E. P. **Permeabilidade das madeiras de Amapá (*Brosimum parinarioides* Ducke) e Faveira (*Parkia gigantocarpa* Ducke)**. 2010. 69 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

BARAÚNA, E. E. P. et al. Efeito da estrutura anatômica e química na permeabilidade da madeira de Amapá. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 1, 2015. No prelo.

BARBOSA, C. G. **Incidência dos defeitos de secagem como índice de qualidade e de seleção genética para madeira de *Eucalyptus***. 2003. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

BARBOSA, C. G. et al. Elaboração de programa de secagem para madeiras de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 40-48, jan./jun. 2005.

BARISKA, M. Collapse phenomena in eucalypts. **Wood Science and Technology**, Zurich, v. 26, n. 3, p. 165-179, 1992.

BATISTA, D. C. **Modificação térmica da madeira de *Eucalyptus grandis* em escala industrial pelo processo brasileiro vap holzsysteme®**. 2012. 339 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

BATISTA, D. C. et al. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 665-674, out./dez. 2010.

BERLYN, G. P.; MIKSCH, J. P. **Botanical microtechnique and cytochemistry**. Ames: Iowa State University, 1976. 326 p.

BRADIC, S. et al. Longitudinal air permeability of pinewood with beetle transmitted blue-stain. **Holz Als Roh-Und Werkstoff**, Berlin, v. 65, n. 3, p. 183-185, June 2007.

BRAMHALL, G. Semi-empirical method to calculate kiln-schedule modifications for some lumber species. **Wood Science**, Madison, v. 8, n. 4, p. 213-223, 1976.

CAI, L. P.; OLIVEIRA, L. C. Gas permeability of wetwood and normal wood of subalpine fir in relation to drying. **Drying Technology**, New York, v. 25, n. 1/3, p. 501-505, 2007.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003. 255 p.

CALONEGO, F. W. et al. Qualidade da secagem de *Eucalyptus grandis* mediante vaporização simultânea em toros e em madeira serrada. **Silva Lusitana**, Lisboa, v. 14, n. 2, p. 168-180, 2006.

CALONEGO, F. W.; SEVERO, E. T. D. Efeito da vaporização de toras na redução dos defeitos associados a tensões de crescimento de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 4, p. 431-440, out. 2005.

CALONEGO, F. W.; SEVERO, E. T. D. Efeito da vaporização de toras na secagem da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 1, p. 7-13, ago./dez. 2004.

CALORI, J. V.; KIKUTI, P. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus dunnii* aos 20 anos de idade. In: EUCALYPTS: IUFRO CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPTS, 1., 1997, Salvador. **Anais...** Colombo: EMBRAPA, 1997. p. 321-326.

CAMPBELL, G. S. The value of presteaming for drying some collapse susceptible Eucalypts. **Forest Products Journal**, Madison, v. 11, n. 8, p. 343-347, 1961.

CHAFE, S. C. Changes in shrinkage, collapse and green volume in the wood of *Eucalyptus regnans* F. Muell after heating in water. **Wood Science and Technology**, Zurich, v. 12, n. 6, p. 341-345, 1992.

CHOAT, B. et al. Pit membrane porosity and water stress-induced cavitation in four co-existing dry rainforest tree species. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 131, n. 1, p. 41-48, Jan. 2003.

CHOAT, B. et al. Structure and function of bordered pits: new discoveries and impacts on whole-plant hydraulic function. **New Phytologist**, Cambridge, v. 177, n. 3, p. 608-626, Dec. 2008.

CHOONG, E. T. et al. Collapse and moisture flow in kiln-drying and freeze-drying of woods. **Wood Science**, London, v. 6, n. 2, p. 127-135, 1973.

CHOONG, E. T. et al. Effect of steaming and hot-water soaking on extractive distribution and moisture diffusivity in southern pine during drying. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 31, n. 2, p. 143-150, 1999.

CINIGLIO, G. **Avaliação da secagem de madeira serrada de *E. grandis* e *E. urophylla***. 1998. 73 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Madeira) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1998.

COMISSÃO PAN-AMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **Descrição macroscópica, microscópica e geral da madeira**. São Paulo, 1974. 19 p.

COMSTOCK, G. L. Directional permeability of softwoods. **Wood and Fiber**, Lawrence, v. 1, n. 4, p. 283-289, 1970.

COMSTOCK, G. L.; COTÊ, W. A. Factors affecting permeability and pit aspiration in coniferous softwoods. **Wood Science and Technology**, New York, v. 2, n. 4, p. 279- 291, 1968.

CONEGLIAN, A. et al. Estimativa do tempo de aquecimento de toras de *Eucalyptus grandis* em água quente. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, Garça, ano 8, n. 13, p. 26-35, fev. 2009.

COOPER, G. A.; BARHAM, S. H. Effects of soaking in extractives and prefreezing on the drying behavior of Eastern Cottonwood. **Wood Science**, London, v. 7, n. 4, p. 267-269, 1975.

COOPER, G. A. et al. Drying behavior of prefrozen black walnut. **Forest Products Journal**, Madison, v. 20, n. 1, p. 30-35, 1970.

COPPEN, J. J. W. *Eucalyptus*: the genus *Eucalyptus*. London: Taylor and Francis, 2002. 450 p.

DASHTI, H. D. et al. Effects of steaming and microwave pretreatments on mass transfer characteristics of aleppe oak (*Quercus infectoria*). **BioResources**, Oxford, v. 7, n. 3, p. 3262-3273, 2012.

DIAZ-VAZ, J. E. et al. Water immersion pretreatment of *Eucalyptus* wood. **Holzforschung**, Berlin, v. 50, n. 5, p. 85-88, 1998.

ERICKSON, R. W. et al. Drying prefrozen redwood. **Forest Products Journal**, Madison, v. 16, n. 8, p. 57-65, 1966.

ERICKSON, R. W. et al. Drying of prefrozen redwood: fundamental and applied considerations. **Forest Products Journal**, Madison, v. 18, n. 6, p. 49-56, 1968.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 157-174, 2009.

FLORSHEIM, S. M. B. et al. Variação nas dimensões dos elementos anatômicos da madeira de *Eucalyptus dunnii* aos sete anos de idade. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 79-91, jun. 2009.

FRANKLIN, G. L. Preparation of thin sections of synthetic resin and wood: resin composites, and a new macerating method for wood. **Nature**, London, v. 155, n. 3924, p. 5, 1945.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 111 p.

GAMA, S. **Introdução à ciência e tecnologia de vácuo**. Campinas: IFGW-UNICAMP, 2002. 20 p.

GIOVANELLA, R.; MUÑIZ, G. Congelamento de madeira: avaliação preliminar de sua utilização. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 2, p. 311-318, 2010.

GLOSSOP, B. R. Effect of hot-water soaking or freezing pretreatments on drying rates of two eucalypts. **Forest Products Journal**, Madison, v. 44, n. 10, p. 29-32, 1994.

GUOXING, D. et al. Study on drying strategies for Eucalyptus lumber with 25mm thickness. In: INTERNATIONAL IUFRO WOOD DRYING CONFERENCE, 8., 2003, Brasov. **Proceedings...** Brasov: IUFRO, 2003. p. 209-211.

HANSMANN, C. et al. Permeability of wood: a review. **Drevarsky Vyskum**, Bratislava, v. 47, n. 4, p. 1-16, 2002.

HART, C. A. **The drying of wood**. Raleigh: North Carolina Agriculture Extension Service, 1966. 24 p.

HART, C. A. Relative humidity, EMC, and collapse shrinkage in wood. **Forest Products Journal**, Madison, v. 34, n. 11/12, p. 45-54, 1984.

HASLETT, A. N.; KININMONTH, J. A. Pre-treatments to hasten the drying of *Nothofagus fusca*. **New Zeland Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 16, n. 2, p. 237-246, 1986.

ILIC, J. Advantages of prefreezing for reducing shrinkage-related degrade in eucalypts: general considerações and review of the literature. **Wood Science and Technology**, Zurich, v. 29, n. 4, p. 277-284, 1995.

ILIC, J. Influence of prefreezing on shrinkage-related degrade in *Eucalyptus regnans* F. Muell. **Holz als Roh und Werkstoff**, Berlin, v. 57, n. 4, p. 241-245, Aug. 1999.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS. List of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 10, n. 3, p. 219-233, 1989.

JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique**. New York: McGraw-Hill, 1940. 523 p.

KAMKE, F. A.; LEE, J. N. Adhesive penetration in wood: a review. **Wood and Fiber Science**, Zurich, v. 39, n. 2, p. 205-220, 2007.

KEEY, R. B.; LANGRISH, T. A. G.; WALKER, J. C. F. **Kiln-drying of lumber**. Berlin: Springer Verlag, 2000. 326 p.

KININMONTH, J. A. Permeability and fine structure of certain hardwoods and effects on drying: 1., transverse permeability of wood to micro-filtered water. **Holzforschung**, Berlin, v. 25, n. 4, p. 127-133, 1971.

KLITZKE, R. J.; BATISTA, D. C. Ensaio de taxa de secagem e escore de defeitos para a predição da qualidade de secagem convencional da madeira de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 85, p. 97-105, mar. 2010.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of wood science and technology: I**, solid wood. New York: Springer, 1968. v. 1, 592 p.

KOLLMANN, F. P. et al. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1975. v. 2, 703 p.

LANTICAN, D. M. et al. Effect of ozone treatment on the hygroscopicity, permeability, and ultrastructure of the hardwood of western red cedar. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 4, n. 2, p. 66-70, 1965.

LATORRACA, J. V. F. **Estudo da viabilidade de uso da espécie *Eucalyptus dunnii* (Maid) na manufatura de painéis madeira-cimento**. 1996. 94 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.

LEHRINGER, C. et al. A review on promising approaches for liquid permeability improvement in softwoods. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 41, n. 4, p. 373-385, Oct. 2009.

LEPAGE, E. S. et al. **Manual de preservação de madeiras**. 2. ed. São Paulo: IPT, 1986. 708 p.

LIU, J. Y. et al. An inverse moisture diffusion algorithm for the determination of diffusion coefficient. **Drying Technology**, New York, v. 19, n. 8, p. 1555-1568, Aug. 2001.

LOPES, C. S. D. et al. Estudo da massa específica básica e da variação dimensional da madeira de três espécies de eucalipto para a indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 315-322, abr./jun. 2011.

- LOPES, O. P. **Anatomia e identificação da madeira de genótipos de *Eucalyptus* spp. plantados no Estado de Minas Gerais**. 2013. 93 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.
- MARTINS, V. A. **Secagem de madeira serrada**. Brasília: IBDF, 1988. 56 p.
- MARTINS, V. A. et al. Secagem convencional de madeira de Eucalipto parte I: *Eucalyptus cloeziana* F. Muell, *E. grandis* Hill ex Maiden e *E. pilularis* Sm. **Brasil Florestal**, Rio de Janeiro, n. 70, p. 42-47, 2001.
- MCMILLEN, J. M.; WENGERT, E. M. **Drying eastern hardwood lumber**. Washington: USDA, 1978. 104 p.
- MIAO, P. et al. Effect of the permeability of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* wood on collapse in drying. **Journal of Nanjing Forestry University**, Nanjing, v. 5, n. 5, p. 83-86, Sept./Oct. 2010.
- MILOTA, M. R. et al. Gas permeability of plantation Loblolly pine. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 27, n. 1, p. 34-40, Mar. 1995.
- MONTEIRO, T. C. **Efeito da anatomia no fluxo da água em madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia***. 2014. 112 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.
- MOREIRA, M. J. **Natureza das interações celulose-água**. 2009. 84 p. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- NASROUN, T. H.; AL-SHAHRANI, T. S. S. The relationship between anatomical structure and some physical properties of wood: the relationship between anatomical properties and permeability of wood. **Arabian Gulf Journal of Scientist Research**, Bahrain, v. 16, n. 3, p. 657-676, 1998.

OLIVEIRA, J. T. S. et al. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 115-127, jan./fev. 2005.

OLIVEIRA, L. S. **Efeitos de pré-tratamentos de água quente e congelamento na secagem e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**. 2003. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

OLIVEIRA, L. S. et al. Efeitos de pré-tratamentos na taxa de secagem da madeira de *Eucalyptus*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 10, n. 2, p. 11-18, 2003.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1980. 722 p.

PEREIRA, J. C. D. et al. **Características das madeiras de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2000. 114 p.

PERRÉ, P.; BADEL, E. De l'eau dans l'arbre à l'eau dans le matériau bois: une introduction. **Revue Forestière Française**, Clermont-Ferrand, v. 4, n. 4, p. 305-315, juil./août. 2006.

PETTY, J. A.; PURITCH, G. S. The effects of drying on the structure and permeability of the wood of *Abies grandis*. **Wood Science and Technology**, Zurich, v. 4, n. 2, p. 140-154, 1970.

PINHEIRO, M. A. **Influência da dimensões da madeira na secagem e nas propriedades do carvão vegetal**. 2013. 69 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

POKKI, J. P. et al. Specific permeability of wood to water part 1: longitudinal specific permeability of steamed, impregnated, and kraft-cooked wood. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 49, n. 5, p. 2144-2154, Mar. 2010.

PONCE, R. H. Madeira serrada de eucalipto: desafios e perspectivas. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1., 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo: LCF/ESALQ/USP, 1995. p. 50-58.

PÖTZSCH, N.; RÜTHER, N. Ermittlung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes von Baustoffen in Abhängigkeit von der Baustofftemperatur. **Bauphysik**, Berlin, v. 31, n. 2, p. 106-109, 2009.

PRATT, G. H. **Timber drying manual**. London: Department of Environment, Building Research Establishment, 1974. 152 p.

PRYOR, L. *Eucalyptus*. In: HALEVY, A. (Ed.). **CRC handbook of flowering**. Boca Raton: Franklin Book, 1985. v. 2, p. 476-482.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. L. Retificação térmica de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS FLORESTAIS, 1., 2010, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBF, 2002. p. 1-10.

QYIANG, Y. et al. Relationships of anatomical characteristics versus shrinkage and collapse properties in plantation-grown eucalypt wood from China. **Journal of Wood Science**, London, v. 52, n. 3, p. 187-194, June 2006.

RAMIRES, E. C. **Biocompósitos a partir de matrizes poliméricas baseadas em lignina, tanino e glicol reforçadas com fibras naturais**. 2010. 277 p. Tese (Doutorado em Físico-Química) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

RASMUSSEN, E. F. **Dry kiln operator's manual**. Washington: USDA, 1961. 197 p.

RAYMOND, C. A. Tree breeding issues for solidwood products. In: THE FUTURE OF EUCALYPTS FOR WOOD PRODUCTS, 1., 2000, Launceston. **Proceedings...** Launceston: IUFRO, 2000. p. 265-270.

REZENDE, R. N. et al. Efeito da vaporização na secagem de tábuas de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 1, 2015. No prelo.

RHATIGAN, R. G. et al. Effect of high temperature on permeability and treatment of western hemlock lumber. **Forest Products Journal**, Madison, v. 53, n. 9, p. 55-58, 2003.

ROCHA, C. D. **Efeito da vaporização na madeira de *Eucalyptus grandis* sobre as suas propriedades químicas e resistência natural a fungos e cupins**. 2011. 121 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrônomicas) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

ROCHA, F. T. et al. Variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden aos sete anos. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 43-55, jun. 2004.

ROZAS, E. M. **Contribuição ao desenvolvimento tecnológico para utilização de madeira serrada de *Eucalyptus grandis* (Hill Ex Maiden) na geração de produtos com maior valor agregado**. 1993. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993.

SANTOS, G. R. V. **Otimização da secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden)**. 2002. 70 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2002.

SANTOS, G. R. V. et al. Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 63, p. 214-220, jun. 2003.

SAYAR, M.; TARMIAN, A. Modification of water vapor diffusion in poplar wood (*Populus nigra* L.) by steaming at high temperatures. **Turkish Journal of Biology**, Ankara, v. 37, n. 4, p. 511-515, Aug. 2013.

SEVERO, E. T. D. **Pré-vaporização: uma técnica para otimizar a secagem de madeira sólida de *Eucalyptus grandis***. 2004. 85 f. Tese (Livre Docência em Secagem da Madeira) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004.

SEVERO, E. T. D. Qualidade da secagem da madeira serrada de *Eucalyptus dunnii*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 109-124, 2000.

SEVERO, E. T. D. et al. Effect of steam thermal treatment on the drying process of *Eucalyptus dunnii* variables. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 4, p. 637-645, out./dez. 2013.

SHACHT, L. et al. Variação genética de indicadores de tensão de crescimento em clones de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 54, p. 55-68, dez. 1998.

SIAU, J. F. **Flow in wood**. Syracuse: Syracuse University, 1971. 131 p.

SIAU, J. F. **Transport processes in wood**. New York: Springer Wood Science, 1984. 245 p.

SILVA, J. C. et al. Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 455-460, maio/jun. 2005.

SILVA, J. C. et al. Permeability measurements of brazilian *Eucalyptus*. **Materials Research**, Pittsburgh, v. 13, n. 3, p. 281-286, 2010.

SILVA, M. R. **Determinação da permeabilidade em madeiras brasileiras de florestas plantadas**. 2007. 120 p. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator s manual**. Madison: USDA, 1991. 274 p.

SKAAR, C. J. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University, 1972. 218 p.

SOARES, T. S. et al. Avaliação econômica de um povoamento de *Eucalyptus grandis* destinado a multiprodutos. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 689-694, set./out. 2003.

SOUZA, C. R. et al. Comportamento da *Acacia mangium* e de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* em plantios experimentais na Amazônia Central. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, p. 95-101, 2004.

SPOLEK, C. A.; PIROOZMANDI, E. Measurement of unsaturated wood permeability by transient flow methods. In: TRECHSEL, H. R.; BOMBERG, M. (Ed.). **Water vapor transmission through building materials and systems: mechanisms and measurement**. Philadelphia: ASTM, 1989. p. 114-122.

STAHL, J. Silvicultura de *Eucalyptus* em áreas de ocorrência de geadas no Sul do Brasil. In: WORKSHOP DE MELHORAMENTO E ADAPTAÇÃO GENOTÍPICA AO ESTRESSE HÍDRICO E TÉRMICO, 6., 2010, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: IPEF, 2010. p. 1-42.

TAGHIYARI, H. R. et al. A correlation between the gas and liquid permeabilities of beech wood heat-treated in hot water and steam mediums. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, Concepcion, v. 13, n. 3, p. 329-336, 2011.

TAGHIYARI, H. R. et al. Study on the longitudinal gas permeability of juvenile wood and mature wood. **Special Topics & Reviews in Porous Media, Begell House Production**, Danbury, v. 1, n. 1, p. 31-38, 2010.

TANAKA, T. et al. A preliminary study on ultrasonic treatment effect on transverse wood permeability. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, Concepcion, v. 12, n. 1, p. 3-9, 2010.

TARMIAN, A.; PERRÉ, P. Air permeability in longitudinal and radial directions of compression wood of *Picea abies* L. and tension wood of *Fagus sylvatica* L. **Holzforschung**, Berlin, v. 63, n. 3, p. 352-356, May 2009.

TEJEDA, A. et al. Reduction of growth stress in logs by direct heat treatment: assessment of a commercial scale operation. **Forest Products Journal**, Madison, v. 47, n. 9, p. 86-93, 1997.

TEREZAWA, S. Methods for easy determination of kiln dryings schedules of wood. **Wood Industry**, Croatia, v. 20, n. 5, p. 1-8, 1965.

TORGOVNIKOV, G.; VINDEN, P. High-intensity microwave wood modification for increasing permeability. **Forest Products Journal**, Madison, v. 59, n. 4, p. 84-92, Apr. 2009.

TRUGILHO, P. F. et al. Efeito da água quente e pressão na determinação da densidade básica da Madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 62, p. 40-47, dez. 2002.

VERMAAS, H. F. Drying eucalypts for quality: material characteristics, pré-drying treatments, drying methods, schedules and optimization of drying quality. **Suid Afrikaanse Bosboutydskrif**, Pretoria, n. 174, p. 41-49, 1995.

VIVIAN, M. A. et al. Efeito de pré-tratamentos na taxa de secagem da madeira de *Hovenia dulcis* Thunb. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 1, n. 2, p. 32-43, nov. 2010.

VIVIAN, M. A. et al. Influência do tratamento térmico nos defeitos de secagem da madeira de *Hovenia dulcis* Thunb. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 2, n. 1, p. 15-28, nov. 2011.

WANGAARD, F. F.; GRANADOS, L. A. The effect of extractives on water vapor sorption by wood. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 1, p. 253-277, 1967.

WRIGHT, G. W. Pre-freezing as a drying treatment. **Forest Products Newsletter**, Columbia, n. 337, p. 6-8, 1967.

YILGOR, N. et al. Physical, mechanical and chemical properties of steamed beech wood. **Forest Products Journal**, Madison, v. 51, n. 11, p. 89-93, Nov./Dec. 2001.

ZHANG, Y.; CAI, L. Impact of heating speed on permeability of sub-alpine fir. **Wood Science and Technology**, Zurich, v. 42, n. 3, p. 241-250, 2008.