



**EDY EIME PEREIRA BARAÚNA**

**PERMEABILIDADE DAS MADEIRAS DE  
AMAPÁ (*Brosimum parinarioides* Ducke) E  
FAVEIRA (*Parkia gigantocarpa* Ducke)**

**LAVRAS – MG  
2010**



**EDY EIME PEREIRA BARAÚNA**

**PERMEABILIDADE DAS MADEIRAS DE AMAPÁ** (*Brosimum  
parinarioides* Ducke) e **FAVEIRA** (*Parkia gigantocarpa* Ducke)

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 Madeira como Matéria-  
prima, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador  
Dr. José Tarcísio Lima

**LAVRAS - MG  
2010**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca da UFLA**

Baraúna, Edy Eime Pereira.

Permeabilidade das madeiras de Amapá (*Brosimum  
parinarioides* Ducke) e Faveira (*Parkia gigantocarpa* Ducke) / Edy  
Eime Pereira Baraúna. – Lavras : UFLA, 2010.

69 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2010.

Orientador: José Tarcísio Lima.

Bibliografia.

1. Madeira. 2. Fluxo. 3. Lei de Darcy. 4. Anatomia. I.  
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 674

**EDY EIME PEREIRA BARAÚNA**

**PERMEABILIDADE DAS MADEIRAS DE AMAPÁ (*Brosimum  
parinarioides* Ducke) e FAVEIRA (*Parkia gigantocarpa* Ducke)**

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 Madeira como Matéria-prima, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 11 de junho de 2010.

Dr. José Reinaldo Moreira da Silva	UFLA
Dr. Sergio Martins de Souza	UFLA
Dr. Elio Lemos da Silva	UFLA
Dr. Renato da Silva Vieira	UFT

Dr. José Tarcísio Lima  
Orientador

**LAVRAS - MG  
2010**

A minha querida mãe, Maria das Graças e meu amado pai, Jeová Fernandes.

A minha amada esposa e amiga, Marcelia Baráúna

### **Ofereço**

À memória de Valmir Souza de Oliveira, meu mentor, amigo e professor.

### **Dedico**

## AGRADECIMENTOS

A Jeová Deus, criador dos céus, terra e de tudo que existe.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Amazonas - FAPEAM, pela concessão da bolsa de doutorado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Tarcísio Lima, pela orientação e conselhos que serão de grande ajuda durante toda a minha vida profissional e pessoal.

Aos meus coorientadores, professores José Reinaldo Moreira da Silva e Paulo Fernando Trugilho, pelos conselhos e incentivo.

Aos professores da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Carlos Alberto Franco Tucci e Hedinaldo Narcísio Lima, pelo o apoio e incentivo em cursar uma pós-graduação fora de minha querida Manaus, AM.

Ao Prof. Dr. Ubaldo Martins das Neves, da Universidade Federal do Tocantins, pelas explicações e elucidações de dúvidas que surgiram durante a elaboração deste trabalho.

A minhas queridas irmãs, Patrícia Baraúna e Paula Fabiane, por todas as palavras de incentivo.

A Nerci Nina Lima, com quem tenho uma dívida de gratidão que jamais conseguirei pagar.

As minhas “irmãs” e amigas de curso de doutorado, Selma Lopes Goulart e Marina Donária Arantes, pela ajuda, alegrias e tristezas que enfrentamos juntos.

A meu grande amigo e também irmão Renato da Silva Vieira, o qual também teve grande participação nesta conquista.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Florestais da UFLA, Claret Matos, Hernane Alves, Gilson, José Francisco, Seu Vico e Francisca Aparecida.

Aos membros da banca, Dr. Elio Lemos e Dr. Sérgio Martins, pela ajuda e valiosas sugestões.

Aos colegas da Ciência e Tecnologia da Madeira: Rafael Nogueira, Luana, Allan, Thiago Campos, Marisa, Sergio Ferreira, Paulo Hein, Livia Cássia, Carlos Rogério e Adalberto cuja convivência tornou melhor a realização deste trabalho.

**"Algo só é impossível até que alguém duvide e acabe provando o contrário."**

**(A. Einstein)**

## RESUMO

Nos Estados do Amazonas e Pará, as madeiras de amapá (*Brosimum parinarioides* Ducke) e faveira (*Parkia gigantocarpa* Ducke) são utilizadas na fabricação de compensados, móveis, tábuas etc. E mesmo essas espécies tendo diversos usos, as pesquisas tecnológicas sobre as propriedades físicas, anatômicas e químicas em ambas as espécies são bastante escassas. E dentre estas características, a permeabilidade é um forte indicativo para se dizer se estas madeiras serão mais permeáveis a preservantes químicos, remoção de água durante o processo de secagem ou colagem. O presente estudo teve como objetivo estudar por meio do fluxo gasoso e líquido a permeabilidade das madeiras de amapá (*Brosimum parinarioides* Ducke) e faveira (*Parkia gigantocarpa* Ducke) oriundas da floresta amazônica. Foram identificadas a influencia das características anatômicas e químicas na permeabilidade da madeira. Os valores de permeabilidade calculados em laboratório foram comparados como os dados de permeabilidade estimados pelo modelo de fluxo longitudinal para folhosas. Na realização deste estudo foram coletadas no Estado do Pará três árvores de amapá e faveira as quais foram processadas em corpos-de-prova os quais foram submetidos aos ensaios de permeabilidade, caracterização anatômica e análise química. A madeira de faveira apresentou valores de permeabilidade longitudinais ao ar atmosférico de  $140,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$  e líquido de  $3,28 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$ . A permeabilidade ao ar na madeira de amapá foi de  $63,7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$  e ao líquido de  $2,0,7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$ . Também ocorreram baixas correlações para ambas as espécies entre a permeabilidade ao ar e líquida e as características anatômicas. Já o modelo de fluxo longitudinal para folhosas superestimou os valores de permeabilidade para ambas as espécies.

Palavras-chave: Madeira. Permeabilidade. Fluxo. Lei de Darcy. Anatomia.

## ABSTRACT

In the states of Amazonas and Pará, wood of amapá (*Brosimum parinarioides* Ducke) and faveira (*Parkia gigantocarpa* Ducke) are used to produce hardboard, furniture, boards, etc. Although being multipurpose, research on these species, addressing physical, anatomical and chemical properties are scarce. Among these features, permeability is a strong indicative of wood permeability to chemical preservatives, removal of water during drying or collage. This work aimed to study wood permeability of two woody species from amazon forest: amapá (*Brosimum parinarioides* Ducke) and faveira (*Parkia gigantocarpa* Ducke), using gaseous and liquid flow. It was verified the influence of anatomical and chemical characteristics on wood permeability. Values of permeability determined in laboratory were compared with data estimated by the longitudinal flow model for broad-leaved species. In order to conduct this study it was collected three trees of amapá and faveira in the state of Pará, which were processed in specimen that were submitted to assays of permeability, anatomical characterization and chemical analysis. The wood of faveira presented values of longitudinal permeability to atmospheric air of  $140,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$  and liquid of  $3,28 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$ . The air permeability of the wood was amapá of  $63,7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$  and liquid of  $2,0,7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$ . It was also observed low correlation for both species between air an liquid permeability with anatomical characteristics. Already the longitudinal flow model for hardwoods overestimated the permeability for both species.

Keywords: Wood. Permeability. Flow. Darcy Law. Anatomy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Corpo-de-prova permeável, ilustrando o significado dos termos na Lei de Darcy (SIAU, 1971).....	21
Figura 2	Modelo de fluxo longitudinal de madeiras de folhosas com vasos abertos (SIAU, 1971).....	28
Figura 3	Esquema da amostragem para o experimento.....	39
Figura 4	Torneamento dos corpos-de-prova prismáticos.....	40
Figura 5	Rotâmetros conectados em série para leitura de vazão do ar atmosférico. ....	41
Figura 6	Conjunto de rolhas e junta cônica de vidro utilizado nos ensaios ao líquido no permeâmetro. ....	42
Figura 7	Corpo-de-prova conectado ao conjunto de rolhas. ....	42
Figura 8	Corte transversal da madeira de amapá, apresentando vasos obstruídos por tilose.....	56
Figura 9	Ajuste da permeabilidade ao ar, calculada em função da permeabilidade ao ar estimada pela equação de Poiseuille (SIAU, 1971), para a madeira de amapá. ....	59
Figura 11	Ajuste da permeabilidade ao ar, calculada em função da permeabilidade ao ar estimada pela equação de Poiseuille (SIAU, 1971), para a madeira de faveira. ....	60
Figura 12	Ajuste da permeabilidade ao líquido, calculada em função da permeabilidade ao líquido estimada pela equação de Poiseuille (SIAU, 1971), para a madeira de faveira. ....	60

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	Objetivos específicos.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1	Faveira ( <i>Parkia gigantocarpa Ducke</i> ).....	16
3.1.1	Características gerais.....	16
3.1.2	Características anatômicas.....	16
3.1.3	Principais aplicações.....	17
3.2	Amapá ( <i>Brosimum parinarioides Ducke</i> ).....	17
3.2.1	Características gerais.....	17
3.2.2	Características anatômicas.....	18
3.2.3	Aplicações.....	19
3.3	Lei de Darcy.....	19
3.4	Tipos de fluxo.....	22
3.4.1	Fluxo viscoso.....	22
3.4.2	Fluxo não linear.....	23
3.4.3	Fluxo molecular ou difusão de Knudsen.....	24
3.5	Permeabilidade da madeira.....	24
3.5.1	Colapso na madeira.....	27
3.5.2	Modelo de permeabilidade aplicável à madeira.....	28
3.6	Fatores que afetam a permeabilidade da madeira.....	29
3.6.1	Influência das características anatômicas e químicas da madeira de folhosas na passagem de fluidos.....	29
3.6.2	Cerne e alburno.....	31
3.6.3	Variação entre espécies.....	32
3.6.4	Lenho primaveril e outonal.....	32
3.6.5	Aspirações das pontoações.....	33
3.6.6	Extrativos.....	34
3.6.7	Efeito da umidade na permeabilidade.....	35
3.6.8	Influência do comprimento da amostra na permeabilidade.....	35
3.7	Formas de determinação da permeabilidade em madeiras.....	36
3.7.1	Medição pelo líquido.....	36
3.7.2	Medição gasosa.....	36
3.7.3	Método do rotâmetro ou fluxômetro.....	37
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	38
4.1	Obtenção do material.....	38
4.2	Preparo das amostras.....	38
4.3	Ensaio de permeabilidade.....	41
4.4	Permeabilidade gasosa.....	43

4.5	Permeabilidade ao líquido .....	43
4.5	Modelo de fluxo longitudinal para folhosas .....	44
4.6	Caracterização anatômica .....	44
4.7	Caracterização química .....	46
4.8	Análise dos dados .....	46
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	47
5.1	Propriedades da madeira de amapá e faveira .....	47
5.2	Características químicas .....	48
5.3	Características anatômicas .....	50
5.4	Permeabilidade da madeira .....	53
5.4.1	Permeabilidade ao ar .....	54
5.4.2	Permeabilidade ao líquido .....	56
5.5	Modelo de fluxo longitudinal para folhosas .....	58
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	63
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	65

## 1 INTRODUÇÃO

O potencial econômico de muitas espécies florestais da amazônia permanece ainda inexplorado, embora já haja algum conhecimento sobre a utilização da madeira de algumas famílias de leguminosas, moraceae e mimosaceae (SANTOS, 2008).

Na floresta amazônica, existem inúmeras espécies com potencial para abastecer a demanda de madeira. Entretanto, poucos estudos são realizados com essas essências, para avaliar o comportamento tecnológico dessas espécies. Segundo Zangiácomo (2003), existem poucas informações disponíveis sobre o potencial da utilização das chamadas espécies alternativas, as quais substituiriam as tradicionais. Com certeza, a valorização de outras madeiras aliviaria a pressão seletiva sobre espécies que se encontram em situação crítica.

Na Amazônia, mais precisamente nos estados do Amazonas e Pará, as madeiras de amapá (*Brosimum parinarioides* Ducke) e faveira (*Parkia gigantocarpa* Ducke) são utilizadas na fabricação de lâminas, compensados, embalagens, brinquedos, móveis, painéis decorativos tábuas, etc. (MAINIERI; CHIMELO, 1989). Ainda que madeira de amapá e faveira tenha diversos usos, as pesquisas tecnológicas nestas duas espécies ainda são bastante escassas.

O estudo sobre as propriedades anatômicas, físicas e químicas dessas madeiras oriundas da floresta amazônica pode gerar conhecimento sobre o comportamento tecnológico das espécies e a influência desse comportamento no diversos produtos delas originados.

Tendo em vista as características citadas, são necessários estudos sobre a permeabilidade da madeira, a qual atua como forte indicativo sobre o deslocamento de fluidos dentro dessas espécies. Conhecendo-se a permeabilidade de amapá e faveira, é possível dizer se elas são mais permeáveis a preservantes químicos, à remoção de água durante o processo de secagem e, no

caso mais específico de produtos fabricados na região norte do país, à fabricação de laminados, compensados, determinando seu comportamento durante o processo de adesão.

As informações sobre a permeabilidade das madeiras contribuem para a obtenção de produtos de qualidade, pois condições e tempo de processamento de produtos à base de madeira são direcionados pela permeabilidade. Assim, valores elevados de permeabilidade indicam a maior facilidade com que essas madeiras poderão ser processadas e tratadas.

Também, a composição química e as características anatômicas têm influência direta na permeabilidade da madeira, tendo em vista que quantidade de extrativos, lignina e de cinzas, números de vasos e diâmetros de vasos, entre outros, são fatores que contribuem com a permeabilidade.

Diante da dificuldade de se avaliar a permeabilidade da madeira, esta pesquisa poderá contribuir com um conhecimento dessa característica física, pois são raras as publicações que relatam estudos sobre permeabilidade ao ar e líquido para madeiras de folhosas e mais precisamente de essências florestais da Amazônia.

Dessa forma, são justificáveis estudos que visem determinar a permeabilidade das madeiras de amapá (*Brosimum parinarioides* Ducke) e faveira (*Parkia gigantocarpa* Ducke) oriundas da floresta amazônica, bem como a influência das características anatômicas e químicas na permeabilidade dessas madeiras.

## **2 OBJETIVOS**

Estudar, por meio do fluxo gasoso e líquido, a permeabilidade das madeiras de amapá (*Brosimum parinarioides* Ducke) e faveira (*Parkia gigantocarpa* Ducke) oriundas da floresta amazônica.

### **2.1 Objetivos específicos**

Avaliar o comportamento das madeiras de amapá e faveira a permeabilidade ao ar atmosférico e aos líquidos no sentido longitudinal e radial.

Avaliar a influência das características anatômicas e químicas na permeabilidade das madeiras de amapá e faveira.

Comparar os valores de permeabilidade ao ar e líquido, determinados experimentalmente, com os valores de permeabilidade estimados, pelo modelo de fluxo longitudinal para folhosas, descrito por Siau (1971).

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Faveira (*Parkia gigantocarpa* Ducke)**

##### **3.1.1 Características gerais**

De acordo com Mainieri e Chimelo (1989), a *Parkia gigantocarpa* Ducke é encontrada em toda a região amazônica, alcançando o nordeste do país. Ocorre principalmente no estado do Pará e recebe também os nomes vulgares de fava ou visgueiro.

A madeira é muito leve e macia ao corte. Apresenta densidade a 15% de umidade de  $0,34\text{g/cm}^3$  e tem o cerne e alborno indistintos quanto à cor, branco-palha levemente rosado. Possui textura grossa, grã direita, superfície moderadamente brilhante e é lisa ao tato. Tem cheiro e gosto imperceptíveis (MAINIERI; CHIMELO, 1989).

##### **3.1.2 Características anatômicas**

Segundo Mainieri e Chimelo (1989), a espécie possui parênquima axial notado a olho nu; vasicêntrico predominante, aliforme losangular com aletas curtas e, ainda, em finíssimas linhas marginais. Há a presença de cristais romboidais em células subdivididas, com dois a dez cristais por série parenquimática. Os poros/vasos são visíveis a olho nu; solitários predominantes (81%), germinados (16%) e raros múltiplos de três poros; médios a muito grandes, predominando os grandes (78%), com média de  $240\ \mu\text{m}$  de diâmetro tangencial; muito poucos a pouco numerosos, predominando os poucos (58%), média de um poro por  $\text{mm}^2$ . As placas de perfuração são simples; elementos vasculares curtos e longos predominantes (97%), média de  $500\ \mu\text{m}$  de

comprimento e pontuações intervasculares poligonais, guarnecidas, grandes, média de 12  $\mu\text{m}$  de diâmetro tangencial. Raios visíveis a olho nu no topo, notados na face tangencial e, na radial, o espelhado dos raios é pouco contrastado; multisseriados, de dois a cinco células de largura, predominando de quatro células; finos predominantes, média de 39  $\mu\text{m}$  de largura; extremamente baixos, média de 0,34 mm de altura, de seis a 34 células de altura, média de 20 células; muito poucos a pouco numerosos, de um a seis raios por mm, média de quatro raios; homocelulares; pontuações radiovasculares semelhantes às intervasculares. As fibras são libriformes; muito curtas a longas, predominando as curtas (74%), média de 1,20 mm de comprimento; médias a largas, predominando as primeiras (73%), com 37  $\mu\text{m}$  de largura média; de paredes muito delgadas predominantes (87%). Camadas de crescimento delimitadas por finíssimas linhas de parênquima marginal.

### **3.1.3 Principais aplicações**

Por apresentar propriedades mecânicas baixas, é indicada para a obtenção de lâminas desenroladas para a fabricação de compensados, embalagens leves, brinquedos etc. (MAINIERI; CHIMELO, 1989).

## **3.2 Amapá (*Brosimum parinarioides* Ducke)**

### **3.2.1 Características gerais**

Segundo Détienné e Jacquet (1983), a madeira é moderadamente pesada e macia ao corte; cerne e alborno indistintos quanto à cor, bege-amarelado, levemente rosado; textura média; grã irregular a reversa; superfície levemente lustrosa; cheiro e gosto imperceptíveis.

### 3.2.2 Características anatômicas

De acordo com estudos de Détienne e Jacquet (1983) e Mainieri e Chimelo (1989), o parênquima axial é notado a olho nu; aliforme de extensão linear, às vezes formando pequenas confluências; óleo-resina presente. Os poros/vasos são notados a olho nu; solitários predominantes (77%), germinados (19%) e raros múltiplos de três a cinco poros; médios a grandes predominantes (98%), média de dois poros por  $\text{mm}^2$ , elementos vasculares curtos predominantes, média de 450  $\mu\text{m}$  de comprimento; pontuações intervasculares poligonais e circulares a ovaladas, de tamanho médio predominante, média de oito  $\mu\text{m}$  de diâmetro tangencial; placa de perfuração simples; tilos de paredes finas presentes. Os raios localizam-se no topo e na face tangencial, notados a olho nu; na face radial, o espelhado dos raios é contrastado; multisseriados, com três a quatro raramente bisseriados; extremamente baixos a muitos baixos predominantes (96%), média de 0,63 mm de altura e média de 27 células de altura; finos a estreitos predominantes (95%), média de 46  $\mu\text{m}$  de largura; poucos a pouco numerosos predominantes (98%), de três a oito raios por mm e média de cinco raios por mm; heterocelulares, com células maginais quadradas e eretas; pontuações radiovasculares circulares e ovaladas, grandes e pequenas, média de 10  $\mu\text{m}$  de diâmetro tangencial; canais secretores e fibrotraqueídes; estreitas a médias, com 23  $\mu\text{m}$  de largura; de paredes delgadas predominando (75%) a espessa (21%) e as raras muito delgadas; curtas e muito curtas predominantes (87%); média de 1,16 mm de comprimento. Camadas de crescimento demarcadas por zonas fibrosas mais escuras.

### 3.2.3 Aplicações

Segundo Mainieri e Chimelo (1989), a madeira de *Brosimum parinarioides* Ducke é indicada para a fabricação de móveis de uso geral, painéis decorativos, lambris e lâminas desenroladas para a fabricação de compensados, embalagens, tábuas em geral, fabricação de metro para medições, cabos de vassoura, etc.

### 3.3 Lei de Darcy

Segundo Kollmann, Kuenzi e Stamm (1975), o fluxo regular de fluidos através da madeira, tanto de líquidos como de gases, obedece à lei de Darcy, onde:

$$\text{Condutividade} = \frac{\text{Fluxo}}{\text{Gradiente}} \quad (1)$$

A condutividade, segundo Siau (1971), é assumida como constante nas leis regulares da Equação 1. Na lei de Darcy, a condutividade é chamada de permeabilidade.

Há várias exceções que fazem a permeabilidade tornar-se variável. E, para que essa lei seja validada (COMSTOCK; COTÊ, 1968; SIAU, 1971, 1984), é preciso que:

- a) o fluxo seja viscoso e laminar. Portanto, a velocidade linear e o fluxo volumétrico são diretamente proporcionais ao diferencial de pressão aplicado ( $\Delta P$ );
- b) o fluido seja homogêneo e incompressível;
- c) a porosidade seja homogênea;
- d) não ocorra interação do fluido com o substrato;

- e) a permeabilidade seja independente do comprimento do sólido na direção do fluxo.

De acordo com Siau (1984), em relato sobre a primeira suposição, o fluxo viscoso ocorre quando as aberturas capilares são pequenas como na madeira. Em tais casos ocorre alto arraste viscoso, devido à alta taxa de área superficial para volume. Sob essas condições, a elevada velocidade de fluxo necessário para haver turbulência é improvável, mas fluxo linear pode ocorrer em velocidade relativamente baixa, em que um fluido move-se de um capilar grande para um pequeno, como do lumem de um traqueídeo para a abertura de uma pontoação. Com relação à segunda suposição, líquidos são essencialmente incompressíveis, mas os gases têm alta compressibilidade (COMSTOCK, 1967).

Siau (1984) afirma que, com relação à terceira e à quarta suposição, a madeira tem uma estrutura complexa e não homogênea, principalmente em folhosas. Além disso, o autor descreve que quando a água flui, existem ligações de hidrogênio com grupos hidroxílicos da superfície.

Esta é a base para a explicação da baixa permeabilidade da madeira para água e soluções aquosas do que líquidos não polares da mesma viscosidade. A lei de Darcy para líquidos pode ser escrita conforme a Equação 2 (SIAU, 1971; SILVA, 2007):

$$K_p = \frac{\text{Fluxo}}{\text{Gradiente}} = \frac{Q/A}{\Delta P/L} = \frac{QL}{A \Delta P} = \frac{Vt}{A \Delta P} \quad (2)$$

em que

$K_p$  = permeabilidade;  $\text{cm}^3(\text{líquido})/\text{cm.atm.seg}$  ou  $\text{m}^3/\text{m}(\text{N/m}^2).\text{s}$

$Q$  = vazão;  $\text{cm}^3/\text{seg}$  ou  $\text{m}^3/\text{s}$

$L$  = comprimento na direção do fluxo, m

$A$  = área perpendicular à direção do fluxo,  $\text{m}^2$

$\Delta P$  = diferencial de pressão,  $\text{N/m}^2$

$V$  = volume,  $\text{m}^3$  e  $t$  = tempo, s.

Desta equação, Siau (1984) deduz que a permeabilidade é numericamente igual à taxa de fluxo através de um cubo unitário de um sólido poroso com pressão diferencial unitária entre duas faces opostas. Esta equação é aplicável a uma amostra com lados paralelos e extremidades, conforme mostrado na Figura 1.

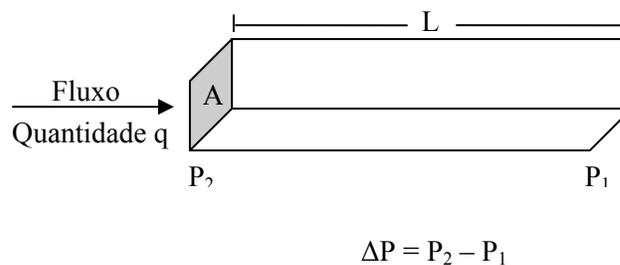


Figura 1 Corpo-de-prova permeável, ilustrando o significado dos termos na Lei de Darcy (SIAU, 1971).

Quando a lei de Darcy é aplicada a um fluxo gasoso, a expansão do gás que ocorre enquanto ele se movimenta ao longo da madeira causa contínuas alterações no gradiente de pressão e no fluxo volumétrico (BOLTON, 1988; KOLLMANN; KUENZI; STAMM, 1975). Levando-se em consideração esses aspectos, a equação de Darcy passa a ser escrita da forma diferencial na Equação 3:

$$K_g = - \frac{q}{A \frac{dP}{dx}} \quad \text{e} \quad K_g \cdot dP = - \frac{Q \cdot dx}{A} \quad (3)$$

em que

$K_g$  = permeabilidade superficial a gases;  $\text{cm}^3/\text{cm} \cdot \text{atm} \cdot \text{s}$  ou  $\text{m}^3/\text{m}(\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$

$x$  = distância na direção do fluxo.

O termo permeabilidade do gás superficial ocorre porque seu valor geralmente excede a permeabilidade do líquido quando são considerados tanto o fluxo viscoso quanto o fluxo de deslizamento.

A isoterma de expansão de um gás ideal devido ao decréscimo de pressão pode ser calculada como na lei geral dos gases, conforme a Equação 4:

$$P.V = n.R.T \quad (4)$$

em que

$n$  = moles de gás;

$R$  = constante universal dos gases = 8,31 J/mol.K

$T$  = temperatura absoluta, K

$P$  = pressão, N/m<sup>2</sup>

$V$  = volume, m<sup>3</sup>

### 3.4 Tipos de fluxo

Siau (1984) define três tipos de fluxos que ocorrem na madeira por movimento capilar, os quais são:

- a) fluxo viscoso ou laminar;
- b) fluxo turbulento;
- c) não linear;
- d) molecular ou difusão de Knudsen.

#### 3.4.1 Fluxo viscoso

Entende-se como viscosidade a fricção interna de um líquido ou gás, a qual requer determinada força para que uma camada do fluido se desloque

suavemente em relação à outra ou para fazer com que uma superfície se desloque em relação à outra quando há um fluido entre elas. O fluxo que resulta quando forças viscosas são superadas resulta regular e alinhado e é denominado fluxo viscoso (SILVA, 2007).

De acordo com a lei de Darcy, a velocidade do fluxo é proporcional à pressão diferencial  $\Delta P$ , a qual proporciona a força necessária para superar a resistência de fricção, ou viscosidade (SIAU, 1984).

### **3.4.2 Fluxo não linear**

De acordo com Siau (1984), o fluxo não linear ocorre devido à perda de energia cinética. É quando um fluido, ao se mover, entra em um capilar curto. O diferencial de pressão é proporcional ao quadrado da taxa de fluxo volumétrico, que é aproximadamente a mesma do fluxo turbulento. O fluxo não linear começa no número de Reynolds, que é igual à taxa do comprimento em relação ao raio do capilar.

A não linearidade pode ocorrer em um número de Reynolds muito baixo, dependendo da estrutura anatômica da madeira ou sólido poroso. Além disso, o fluxo não linear é difícil de se distinguir do fluxo turbulento por meio da medição da relação entre fluxo e gradiente porque, em ambos os casos, o diferencial de pressão é aproximadamente proporcional ao quadrado da taxa de fluxo (SIAU, 1984).

Na madeira, em que o fluido entra nas aberturas de pontoações vindas de vasos ou traqueídeos, o fluxo não linear poderia ocorrer em número de Reynolds entre 0,04 e 16, assumindo raios de 0,005 e 2  $\mu$  e espessura da membrana da pontoação de aproximadamente 0,1  $\mu$ .

### 3.4.3 Fluxo molecular ou difusão de Knudsen

Siau (1984) descreve que o fluxo molecular, ou difusão de Knudsen, consiste na difusão molecular através de um capilar, devido ao gradiente de pressão que surge da pressão aplicada. Ela ocorre em complemento ao fluxo viscoso e torna-se muito importante no fluxo gasoso quando o caminho livre dos gases é aproximadamente igual ao raio capilar. O efeito é mais importante em baixas pressões. Neste caso, diferenciando-se muito da lei de Darcy.

O terceiro tipo de fluxo descrito por Siau (1984), denominado deslizamento molecular, pode ser notado em gases, uma vez que o tamanho das aberturas (passagens) é aproximadamente igual à distância média pela qual as moléculas passam, antes de sofrerem colisões com outras moléculas.

### 3.5 Permeabilidade da madeira

Permeabilidade é a medida da facilidade com que fluidos são transportados através de um sólido poroso, sob a influência de um gradiente de pressão (SIAU, 1971, 1984). A permeabilidade depende da porosidade, mas nem todo corpo poroso é permeável.

A permeabilidade da madeira aos líquidos e gases se reconhece como de vital importância nos variados processos em que ela está presente antes ou durante seu uso comercial, impregnação, polpação, colagem etc. (RICE; ONOFRIO, 1996). Todos esses processos são influenciados pela permeabilidade. A madeira mais permeável, evidentemente, pode ser mais facilmente tratada ou seca (SILVA et al., 2008; TARMIAN; PERRÉ, 2009).

A permeabilidade é calculada pela relação entre o fluxo e o gradiente, conforme a Equação 5, que expressa a Lei de Darcy.

$$K = \frac{V \cdot L}{A \cdot \Delta P \cdot t} \quad (5)$$

em que

$K$  = permeabilidade,  $\text{cm}^3/\text{cm.atm.s}$  ou  $\text{m}^3/\text{m}(\text{N}/\text{m}^2).\text{s}$ ;

$V$  = volume do líquido fluindo através da amostra,  $\text{cm}^3$  ou  $\text{m}^3$ ;

$t$  = tempo do fluxo, s;

$L$  = comprimento da amostra em direção do fluxo, cm ou m;

$A$  = área transversal da amostra, perpendicular à direção do fluxo,  $\text{m}^2$ ;

$\Delta P$  = pressão diferencial ( $P_2 - P_1$ ) entre os extremos da amostra,  $\text{dina}/\text{cm}^2$ .

De acordo com Siau (1971), para determinar a permeabilidade da madeira, é necessário observar três princípios básicos da Lei de Darcy:

- a) o movimento do líquido deve ser constante e sob pressão constante, ter duração prolongada;
- b) o movimento deve ser proporcional à pressão;
- c) ao inverter a direção do fluxo, este não deve causar efeitos no movimento.

Sendo assim, a permeabilidade é, essencialmente, uma função do meio poroso e deverá ser independente do líquido, desde que este não produza qualquer efeito na sua estrutura.

A permeabilidade somente pode existir se os espaços vazios são interconectados por aberturas. As coníferas são permeáveis porque os lumens dos traqueídeos são ligados por pares de pontoações com passagens nas membranas. Se essas membranas estiverem obstruídas ou incrustadas ou as pontoações forem aspiradas, a madeira assume a estrutura de célula fechada e pode ter a permeabilidade próxima a zero (SIAU, 1984).

Diversos autores evidenciaram em seus estudos que a permeabilidade da madeira é elevada no sentido longitudinal ou paralelo às fibras, quando comparada com o sentido transversal (CHOONG; MCMILLIN; TESORO,

1975; COMSTOCK, 1965, 1970; KUENZI; STAMM, 1975; LEPAGE et al., 1986; SIAU, 1971, 1984; SKAAR, 1972; TARMIAN; PERRÉ, 2009).

Segundo Brandão (1989), uma madeira cuja estrutura anatômica represente um grande volume de vasos poderá ter permeabilidade acentuada, contudo, ainda não se conhece relação direta entre permeabilidade e porosidade.

Em um estudo avaliando a permeabilidade e a estrutura de *Nothofagus fusca* e de *Eucalyptus regnans* e o efeito disso na secagem, Kinimonth (1971 citado por BRANDÃO, 1989) encontrou que, nas duas espécies, o alburno foi mais permeável radialmente e tangencialmente em diferentes pressões acima de 60 cm de Hg, o que não ocorreu com o cerne. De acordo com o autor, a parte externa foi significativamente mais permeável do que a parte mais interna. Entretanto, diferenças entre fluxos na direção radial e tangencial não foram constantes.

Em seus estudos sobre o comportamento da água nas coníferas, Siau (1971) estabelece que o fluxo é realizado essencialmente pelo traqueídeos, os quais estão interconectados um a um por meio dos pares de pontoações areoladas. As aberturas das pontoações, sendo extremamente pequenas em diâmetro quando comparadas com os traqueídeos, são as principais responsáveis por uma maior resistência ao fluxo. Dessa forma, o número e as condições dos pares de pontoações determinam, nas coníferas, a sua permeabilidade (SILVA, 2007).

Para as folhosas, Siau (1971) afirma que, no sentido longitudinal, o fluxo de água é mais proeminente do que no fluxo transversal. Segundo o autor, isso ocorre devido ao fato de os diâmetros dos vasos serem maiores quando comparados ao tamanho das pontoações existentes nas fibras e raios. Também a permeabilidade longitudinal está diretamente relacionada à distribuição, ao diâmetro e ao conteúdo dos vasos (KOLLMANN; KUENZI; STAMM, 1975).

Siau (1984) comenta que os valores radiais são cerca de 17% a 25% elevados quando comparados com o plano tangencial. Isso é explicado pela quantidade e o arranjo das paredes celulares a serem cruzadas pela água, em cada uma das direções da madeira.

### **3.5.1 Colapso na madeira**

O colapso é um defeito que ocorre em algumas espécies quando o cerne saturado é submetido à secagem. É uma forma de contração que ocorre durante a secagem acima do ponto de saturação das fibras, devido ao achatamento ou à deformação das cavidades celulares, evidenciado, às vezes, como uma contração excessiva e/ou desigual (KLITZKE, 2003). Segundo Ponce e Watai (1985), o colapso, diferentemente de outros defeitos de secagem, começa antes que toda água livre tenha saído das cavidades das células, ou seja, antes que a contração normal tenha iniciado.

Esse defeito geralmente acontece em madeiras pouco permeáveis (eucalipto, carvalho, imbuia, etc.). O colapso é associado a condições de temperaturas elevadas, baixa permeabilidade da madeira, umidade relativa e período de secagem (BARBOSA et al., 2005; GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

A madeira colapsada torna-se plasticizada, com redução da resistência à compressão, o que possibilita, com esforços elevados, o esmagamento interno da estrutura. O colapso pode ser externo e interno (favo de mel). Externamente, a madeira com colapso apresenta-se torcida, como resultado de deformações nas células que nestas áreas encontram-se achatadas ou torcidas. Em casos mais severos, apresenta-se como o efeito conhecido da tábua de lavar, ou seja, o aparecimento de sulcos ou enrugamentos (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

O colapso também é relacionado com a quantidade de extrativos presentes na madeira, pois estes obstruem as aberturas das pontoações, dificultando o movimento do ar. Hart (1984 citado por CAVALCANTE, 1991), estudando *Liquidambar styraciflua*, relatou colapso mais constante em áreas escurecidas, nas quais existem maiores quantidades de extrativos, indicando que essas substâncias obstruíram as pontoações.

De acordo com Cavalcante (1991), o colapso pode ser recuperado por acondicionamento a vapor, mas, dependendo da intensidade das rachaduras de superfícies e internas, torna-se irreversível.

### 3.5.2 Modelo de permeabilidade aplicável à madeira

#### 3.5.2.2 Modelo de fluxo longitudinal em folhosas

O modelo de fluxo longitudinal em folhosas baseia-se nos capilares da madeira circulares, paralelos e uniformes. É aplicável a vasos abertos de folhosas de poros difusos na direção longitudinal às fibras (Figura 2).

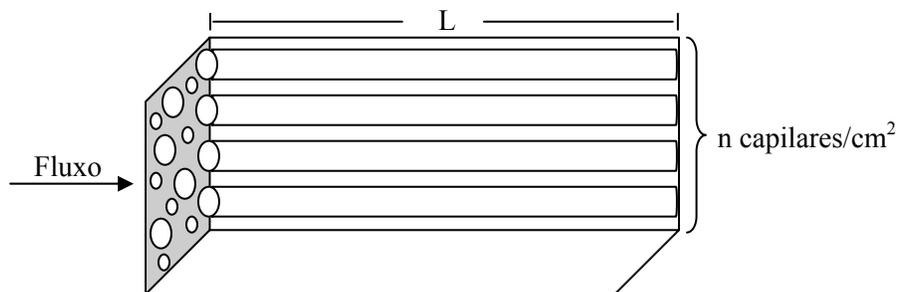


Figura 2 Modelo de fluxo longitudinal de madeiras de folhosas com vasos abertos (SIAU, 1971).

Para isso, é preciso calcular os raios dos capilares “r” e o número de capilares “n” por cm<sup>2</sup> de área transversal, como descrito na Equação 6:

$$K = \frac{Nnr^4}{8\eta} \cdot 1,013 \cdot 10^6 \quad (6)$$

em que

K = permeabilidade em cm<sup>3</sup>/cm de fluidos/atm.s ou m<sup>3</sup>/m(N/m<sup>2</sup>).s;

N = frequência de vasos por cm<sup>2</sup>;

r = raio dos vasos em cm ou m;

η – viscosidade do fluido em poise ou N.s/m<sup>2</sup>.

Esse modelo pode ser utilizado para comparar a permeabilidade ao ar de folhosas no sentido longitudinal, calculado de medidas de valores de n e r, com valores experimentais. Uma razoável concordância dos dois valores foi encontrada para várias espécies de folhosas.

### **3.6 Fatores que afetam a permeabilidade da madeira**

#### **3.6.1 Influência das características anatômicas e químicas da madeira de folhosas na passagem de fluidos**

Os elementos responsáveis pela circulação de líquidos nas dicotiledôneas são, principalmente, os vasos (BRANDÃO, 1989). Cada célula constituinte de um vaso é denominada elemento vascular. Os vasos são elementos tubulares de forma, dimensão e distribuição no anel de crescimento, variando de acordo com a espécie.

Lepage et al. (1986 ) citam que a comunicação entre os elementos de vaso é feita por meio de aberturas orientadas transversalmente. Essas aberturas, que permitem a circulação de líquidos entre os elementos de vasculares, são denominadas placa de perfuração, cujas discontinuidades podem ser simples e múltiplas.

A resistência à passagem de líquidos entre os diferentes tipos de placas de perfurações é baixa, uma vez que as aberturas são grandes e as placas são relativamente finas. Por outro lado, a circulação dos líquidos ocorre com maior intensidade através dos vasos, quando estes possuem placa de perfuração simples (LEPAGE et al., 1986). Tal passagem ocorre por não haver obstáculos ao líquido. Vaso com este tipo de placa comporta-se como um tubo largo sem obstáculos. As aberturas menores dos outros tipos facilitam a deposição de substâncias incrustantes que podem bloquear ou dificultar a passagem dos líquidos através dos vasos, conseqüentemente reduzindo a permeabilidade da madeira (MILOTA et al., 1995).

As pontoações ou aberturas que permitem o intercâmbio entre os vasos são denominadas de intervarculares (ESAU, 1960). A estrutura da membrana dessas pontoações é diferente das areoladas das coníferas; é menos permeável e sem o torus diferenciado. Certas espécies se caracterizam por apresentar pontoações com ornamentações, as quais podem reduzir significativamente a permeabilidade.

A facilidade ou não do escoamento do fluxo de líquidos depende dentre outros fatores, do diâmetro dessas pontoações ou aberturas, que variam de 5 a 10  $\mu\text{m}$ . A permeabilidade da madeira está relacionada diretamente com o diâmetro das aberturas (COMSTOCK, 1970).

Entretanto, quando o diâmetro da abertura é maior que 10  $\mu\text{m}$ , há grande possibilidade de formação de tilos. Essas estruturas são expansões parenquimáticas de células adjacentes ao vaso, que penetram através da cavidade da pontoação para o interior do elemento vascular. Os tilos são constituídos por protoplasmas das células parenquimáticas e de substâncias de reserva em forma de amido, cristais, resina, gomas, etc. (LEPAGE et al., 1986). Os tilos podem obstruir parcial ou totalmente os vasos, diminuindo gradualmente a permeabilidade da madeira (SILVA, 2007).

Quando as pontoações radiovasculares são pequenas, as células radiais podem produzir substâncias gomosas e resinosas que se incrustam nos vasos.

Siau (1971) cita que as membranas das pontoações são incapazes de sofrer aspiração, devido à ausência do torus. Também não existe abertura aparente para o fluxo de líquidos, sem barreiras e não há evidências experimentais de que os pares de pontoações das folhosas sejam permeáveis aos fluidos. É possível que existam caminhos tortuosos de fluxo entre os cordões microfibrilares.

Lepage et al. (1986) citam que as fibras podem constituir cerca de 50% do volume de madeira, em algumas espécies de dicotiledôneas. Os fluidos são capazes de atingir as fibras a partir dos vasos e células do parênquima e através dos pares de pontoações existentes nas suas paredes próximas. Segundo Silva (2007), as fibras são de pouca importância como caminhos de fluidos.

### **3.6.2 Cerne e alburno**

Siau (1971) descreve a diferença de permeabilidade entre o cerne e o alburno. O alburno recebe tratamentos preservantes ou secagem com mais facilidade do que o cerne. Foram determinadas as relações de fluxo entre o alburno e o cerne de algumas espécies, variando em 34:1 (*Pseudotsuga* sp.), em 10:1 (*Tsuga* sp.) e em 6:1 (*Thuja* sp.).

A microscopia eletrônica indica que, no caso do cerne, a permeabilidade é menor devido a três mecanismos principais:

- a) aspirações das pontoações na árvore viva durante as mudanças fisiológicas da madeira;
- b) obstrução das pontoações, formadas por gomas, resinas, etc.;

- c) incrustação das membranas de pontoações por substâncias ligninosas, que se distinguem dos extrativos por não serem solúveis em solventes orgânicos.

### **3.6.3 Variação entre espécies**

Siau (1984) afirma que, devido à grande variação da estrutura da madeira, como tamanho, distribuição e número de elementos condutores, além da presença e da intensidade de obstruções, etc., a permeabilidade varia consideravelmente entre diferentes espécies, resultando nas relações de  $5 \times 10^6:1$ , para folhosas e de  $5 \times 10^5:1$  nas coníferas, entre a maior e a menor permeabilidade determinada.

### **3.6.4 Lenho primaveril e outonal**

De acordo com Siau (1971), existem evidências contraditórias a respeito de qual dos lenhos, primaveril e outonal, é o mais permeável. Fatores como tamanho, rigidez, estrutura e número de pontoações presentes nas células, diferenças na massa específica, tipo e tamanho das células condutoras, entre outros, influem na permeabilidade. Geralmente, o lenho primaveril é considerado o mais permeável, especialmente para folhosas. Entretanto, em algumas coníferas, como o *Pinus* sp., o lenho outonal mostra ser mais permeável devido à estrutura rígida das pontoações que não permitem uma completa aspiração.

### **3.6.5 Aspirações das pontoações**

#### **3.6.5.1 Aspiração de pontoação**

A aspiração de pontoação constitui-se no deslocamento do torus a partir de sua posição inicial central, no interior das cavidades das duas pontoações que formam um par de pontoações, até encontrar as aréolas de uma destas pontoações. Nesta situação, o torus é mantido firmemente preso às aréolas, tendo como consequência o estiramento da rede de microfibrilas de que é composto o margo e, fundamentalmente, a obstrução da pontoação (SIAU, 1971).

A aspiração de pontoação, de acordo com Siau (1971), pode ocorrer como um fenômeno natural, quando da transformação do alburno em cerne e em locais de injúrias sofridas pelo alburno. Sendo assim, os extrativos, segundo o autor, atuam como adesivos, reforçando a ligação entre o torus e a aréola da pontoação. No alburno da madeira no estado verde, a maioria das membranas se encontra centralizada dentro das cavidades das pontoações que são completamente permeáveis quando não obstruídas por outros elementos, como resinas ou incrustações. Essas membranas, bem como as pontoações do cerne, que estejam centralizadas, podem ser deslocadas em direção às aréolas das pontoações, permanecendo em contato com as mesmas, em função da secagem da madeira.

Keey, Langrish e Walker (2000) e Milota et al. (1995) afirmam que as pontoações aspiradas ou fechadas reduzem sensivelmente a permeabilidade da madeira, aumentando, assim, as dificuldades de impregnação pelos líquidos. Geralmente, a aspiração da pontoação é relacionada com a tensão superficial do líquido da madeira, sendo ela ativada durante a secagem da madeira.

Comstock e Cotê (1968) descrevem que, nas madeiras de coníferas, a maioria das pontoações está aberta no alburno verde. Com a queda do teor de

umidade, aumenta gradualmente a proporção de pontoações aspiradas, até o ponto de saturação das fibras (PSF), no qual quase todas as pontoações já estarão aspiradas.

A influência da tensão superficial na aspiração das pontoações ocorre porque:

a) a aspiração das pontoações pode ser praticamente diminuída pela substituição da água que se encontra na madeira verde por solventes orgânicos de baixa tensão superficial, como álcool, metanol, acetona etc. Sua secagem permite que as pontoações fiquem abertas, condicionando alta permeabilidade;

b) constata-se que; abaixo de uma tensão superficial de aproximadamente 26 dinas/cm, não ocorre aspiração das pontoações;

c) tratamentos químicos da madeira que alteram os grupos OH (esterificação e eterificação) também impedem a aspiração das pontoações, indicando, assim, importante papel desses grupos neste processo.

### **3.6.6 Extrativos**

De acordo com Klook (2005) e Pereira et al. (2000), extrativos são componentes químicos acidentais, não essenciais na estrutura da parede celular e na lamela média. Ainda segundo os autores, esses extrativos são solúveis em água ou outros solventes orgânicos neutros. Entre os extrativos, podem-se citar resinas, graxas, ceras, taninos, etc.

As resinas de madeiras de folhosas estão localizadas nas células de parênquima do raio que estão conectados com os vasos. Segundo Milota et al. (1995) e Silva (2007), a quantidade de extrativos presentes na madeira também, de certa forma, influenciará na permeabilidade, pois, segundo esses autores, madeiras com alto teor de extrativos são menos permeáveis do que madeiras com menor quantidade de componentes químicos.

### **3.6.7 Efeito da umidade na permeabilidade**

É necessário que a água livre seja removida da madeira antes de impregná-la com uma solução preservante (LEPAGE et al., 1986). Espera-se que madeira acima do PSF possua baixa permeabilidade porque altas pressões capilares devem ser superadas para forçar as bolhas de ar através de minúsculas aberturas.

Por outro lado, Siau (1971) afirma que, se a madeira estiver completamente saturada com um líquido não polar, não haveria bloqueio de ar e a permeabilidade seria igual para gases. Ainda segundo o mesmo autor, a umidade da madeira abaixo do PSF possibilita que:

- geralmente, a permeabilidade de coníferas aumenta quando a umidade decresce, mas a diferença não é muito significativa em termos da influência na impregnação por líquidos. O aumento é de duas a três vezes, quando a umidade diminui de 24% para 6%. Isso ocorre, provavelmente, devido ao fato de as fitas de microfibrilas do margo se contraírem;

- várias folhosas exibiram efeito oposto com o aumento da permeabilidade longitudinal com o aumento da umidade. Possivelmente, isso acontece devido ao aumento no volume fraccional dos vasos.

### **3.6.8 Influência do comprimento da amostra na permeabilidade**

Segundo Bramhall (1971), a permeabilidade decresce quando o comprimento da amostra aumenta. Siau (1984), estudando *Picea glauca*, notou que a permeabilidade longitudinal ao ar decresceu quando o comprimento aumentou de 0,32 cm para 2 cm. Esse efeito é notado com mais magnitude em madeiras de baixa permeabilidade, como nos estudos de Amemiya (1962 citado por BRAMHALL, 1971) que notou um decréscimo na permeabilidade de

amostras medindo 20 cm de comprimento, quando comparadas com amostras de 5 cm de comprimento de madeira de sugi (*Cryptomeria japonica*).

### **3.7 Formas de determinação da permeabilidade em madeiras**

#### **3.7.1 Medição pelo líquido**

O fluxo de líquidos através da madeira é extremamente complicado devido à ação das forças de capilaridade, pois o ar aumenta as forças de resistência viscosa que determina a permeabilidade. Por isso, Siau (1984) relata que é preciso dearear o líquido ao máximo. Também existe a presença de matéria particulada que pode entupir as minúsculas aberturas das pontoações e esses devem ser removidos por microfiltração.

Em seus estudos, Comstock (1965, 1967) determinou a permeabilidade do alborno e do cerne de *Picea glauca* com líquidos não dilatantes e nitrogênio gasoso e constatou que as permeabilidades específicas foram iguais quando a diferença de viscosidade e o fluxo molecular do gás foram desconsiderados.

#### **3.7.2 Medição gasosa**

De acordo com diversos autores (KOLLMANN; COTÊ, 1968; SIAU, 1971, 1984; SILVA, 2007; TARMIAN; PERRÉ, 2009), o procedimento para a medição da permeabilidade gasosa é muito mais simples, devido à eliminação dos problemas associados com forças capilares. Também, as principais diferenças da lei de Darcy no fluxo gasoso, como expansão do gás e difusão de Knudsen, podem ser descontadas. Os autores afirmam que essa medição é vantajosa porque ela torna possível calcular raios e separar alta e baixa permeabilidade em série. Medições gasosas são mais convenientemente feitas

com ar, mas devem-se tomar precauções, como remover a umidade e particulados do ar, mediante a ação de dessecantes e microfiltração.

### 3.7.3 Método do rotâmetro ou fluxômetro

No método do rotâmetro ou fluxômetro, segundo Siau (1984), o vácuo inicial é aplicado em uma das extremidades do corpo-de-prova. Este vácuo puxa o ar atmosférico, o qual passa pelo rotâmetro e este registra a quantidade de ar ou gás que passa pela amostra. De acordo com Siau (1971) e Silva (2007), o método utiliza estado fixo de escoamento desde que a taxa de fluxo e gradiente seja constante. Para este método, a equação de Darcy é adaptada assim como descrito na Equação 7:

$$K_g = \frac{1000QP_a}{44P_m(P_a - \Delta P_m)} \quad (7)$$

em que

Q = taxa de escoamento do gás, cm<sup>3</sup>/seg;

P<sub>a</sub> = pressão atmosférica, cm de mercúrio;

ΔP<sub>m</sub> = leitura inicial do manômetro, cm de mercúrio.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Obtenção do material**

Para o presente estudo, foram obtidas madeiras de três árvores de faveira (*Parkia gigantocarpa* Ducke) e amapá (*Brosimum parinarioides* Ducke) de uma floresta natural pertencente à CIKEL Brasil Verde S/A, empresa que tem selo de certificação do *Forest Stewardship Council* (FSC). Está localizada no município de Paragominas, no estado do Pará, nas coordenadas de 3°57'S de latitude e 48°64'W de longitude.

As árvores tinham altura comercial de 40 m e de cada uma foram retiradas toras de 200 cm de comprimento. Após o traçamento do fuste, as toras foram enviadas à serraria da empresa, onde foram retiradas três tábuas por árvore, nas dimensões de 200 cm de comprimento, 65 cm de largura e 3,0 cm de espessura.

### **4.2 Preparo das amostras**

De cada três tábuas por árvore foram produzidos os corpos-de-prova, conforme esquema de amostragem apresentado na Figura 3.

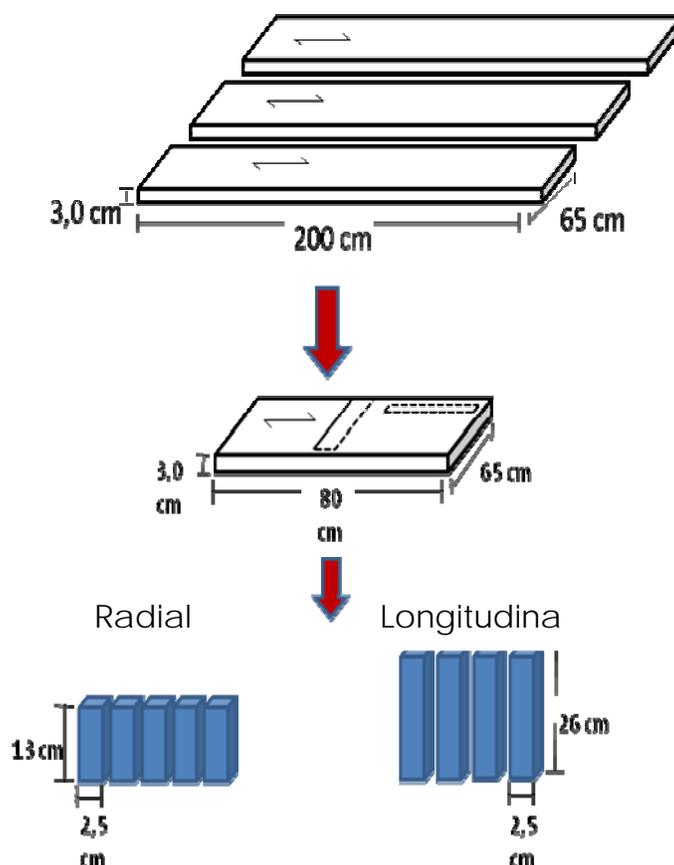


Figura 3 Esquema da amostragem para o experimento.

Os corpos-de-prova do cerne, na forma prismática, foram levados ao Laboratório de Usinagem da Madeira da Universidade Federal de Lavras (UFLA) e foram torneados (Figura 4) para adquirirem a forma cilíndrica com dimensões de 20 mm de diâmetro. Para o torneamento das amostras radiais foi utilizado um torno para materiais de aço e, para evitar quebras das amostras durante o processo de torneamento das amostras no sentido transversal às fibras, utilizou-se o comprimento de 13 cm. Nas amostras longitudinais, foi empregado

um torno para madeiras e as amostras para este processo eram de 26 cm de comprimento.



Figura 4 Torneamento dos corpos-de-prova prismáticos.

Após este procedimento, os corpos-de-prova foram acondicionados em sala climática com temperatura de  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $60\pm 5\%$ , até massa constante. Transcorrida esta etapa, procedeu-se a impermeabilização das laterais dos corpos-de-prova com resina epóxi de baixa fluidez, para garantir a permeabilidade somente pelo tops. Essa impermeabilização foi feita com uso de espátulas e/ou pincel em movimentos retilíneos e tomou-se o cuidado de não deixar áreas sem revestimento. Novamente, os corpos-de-prova retornaram para a climatização para a cura do adesivo e estabilização até massa constante.

Após a cura do adesivo e estabilização até massa constante, os corpos-de-prova em formato cilíndrico foram seccionados em serra circular para atingirem o comprimento necessário ao ensaio de permeabilidade. Esse procedimento foi utilizado para evitar que a resina escorresse pelas laterais e obstruísse os tops superiores dos corpos-de-prova, causando perda de fluxo. As dimensões de cada amostra foram de 20 mm de diâmetro e 50 mm de

comprimento, totalizando, para cada uma das três árvores de amapá e faveira, 15 corpos-de-prova por tábua no sentido longitudinal e 15 no sentido radial.

### 4.3 Ensaio de permeabilidade

O equipamento para o ensaio da permeabilidade ao ar atmosférico é dotado de três rotômetros conectados em série (Figura 5), nas seguintes escalas e sequência: 10 a 100 l/h, 10 a 180 l/h e 100 a 1100 l/h.

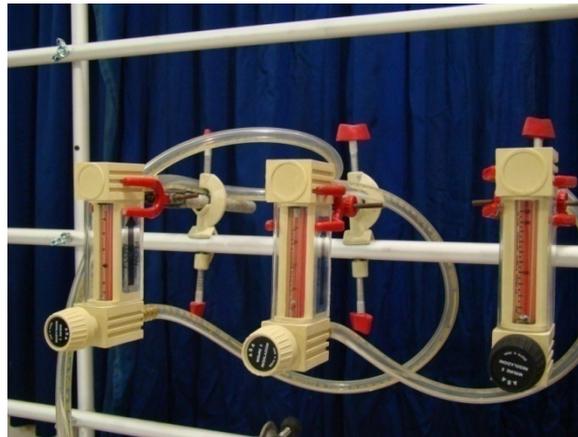


Figura 5 Rotômetros conectados em série para leitura de vazão do ar atmosférico.

A leitura de vazão de ar foi obtida pelo rotômetro de menor escala e, quando não era possível a leitura, ia-se para a medida do segundo ou do terceiro rotômetro. Esses rotômetros tinham a finalidade de medir o fluxo de ar por meio dos corpos-de-prova. Para tanto, os corpos-de-prova foram colocados em um dispositivo, em que, em uma extremidade da amostra, eram ligados os medidores de vazão e, em outra extremidade, foi aplicada sucção. Nesta etapa, anotaram-se a vazão de ar no corpo-de-prova; o tempo, em minutos, em que o fluxo tornou-se constante e a pressão indicada pelo manômetro da bomba de vácuo.

Para o ensaio ao líquido, no lugar dos rotômetros, foi ligada uma bureta de 50 ml. Neste ensaio, utilizou-se a mesma metodologia adotada por Silva (2007), em que se confeccionou um conjunto de rolhas no qual a amostra era colocada com uma face em sucção mediante uma junta cônica de vidro (Figuras 6 e 7) e a outra extremidade do corpo-de-prova foi conectada à bureta.

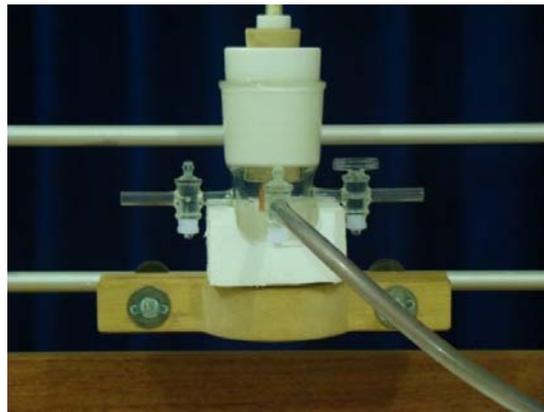


Figura 6 Conjunto de rolhas e junta cônica de vidro utilizado nos ensaios ao líquido no permeâmetro.



Figura 7 Corpo-de-prova conectado ao conjunto de rolhas.

O ensaio procedeu-se da seguinte forma: com o auxílio de um cronometro digital, verificou-se o tempo em que 30 ml de água destilada

percorria todo o corpo-de-prova, quando submetido à sucção. Feito isso, registrou-se a pressão indicada no manômetro da bomba de vácuo.

Tanto para o ensaio ao ar atmosférico quanto ao líquido, utilizaram-se amostras cortadas no sentido longitudinal e radial.

#### 4.4 Permeabilidade gasosa

Para determinar a permeabilidade gasosa da madeira, foi utilizada a Equação 8, seguindo a lei de Darcy, sendo:

$$K_g = \frac{V \cdot P}{A \cdot L \cdot \Delta P \cdot t} \quad (8)$$

em que

$K_g$  - permeabilidade ao gás ( $\text{cm}^3/\text{cm} \cdot \text{atm} \cdot \text{s}$  ou  $\text{m}^3/\text{m}(\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$ );

$V$  - volume do fluxo de gás que percorre a espécie ( $\text{cm}^3/\text{s}$  ou  $\text{m}^3/\text{s}$ );

$L$  - comprimento da amostra (cm ou m);

$P$  - pressão (atm ou  $\text{N}/\text{m}^2$ );

$\Delta P$  - diferença de pressão (atm ou  $\text{N}/\text{m}^2$ );

$t$  - tempo (s);

$A$  - área da seção transversal ( $\text{cm}^2$  ou  $\text{m}^2$ );

$\bar{P}$  - média da pressão no corpo-de-prova (atm ou  $\text{N}/\text{m}^2$ ).

#### 4.5 Permeabilidade ao líquido

A permeabilidade ao líquido também foi determinada pela lei de Darcy, utilizando-se a Equação 9:

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

em que

$K_l$  - permeabilidade ao líquido ( $\text{cm}^3/\text{cm} \cdot \text{atm} \cdot \text{s}$  ou  $\text{m}^3/\text{m}(\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$ );

V – volume de líquido fluindo pela espécie ( $\text{cm}^3/\text{s}$  ou  $\text{m}^3/\text{s}$ );

L – comprimento da amostra (cm ou m);

t – tempo (s);

A – área da seção transversal ( $\text{cm}^2$  ou  $\text{m}^2$ );

$\Delta P$  – diferença de pressão (atm ou  $\text{N}/\text{m}^2$ ).

#### **4.5 Modelo de fluxo longitudinal para folhosas**

Para calcular a permeabilidade da madeira mediante o modelo de fluxo longitudinal para folhosas, utilizou-se a Equação 6, a qual emprega a frequência de vasos, o raio dos vasos e a viscosidade do fluido. A viscosidade do ar ( $\eta$ ) para uma temperatura de  $20^\circ\text{C}$  foi de 0,000181 poise. Para o líquido, foi empregado o valor de 0,01005 poise. Estes valores foram obtidos nos trabalhos de Sears e Zemansky (1970).

Os valores de permeabilidade estimados por este modelo foram comparados com os valores de permeabilidade calculados experimentalmente pelas Equações 8 e 9.

#### **4.6 Caracterização anatômica**

Após os ensaios dos corpos-de-prova para a determinação da permeabilidade ao ar e líquido, foi realizada a análise anatômica nas amostras, para observar o efeito dos elementos anatômicos na permeabilidade. Sendo assim, de cada corpo-de-prova ensaiado no permeâmetro retiraram-se amostras, nas dimensões de 1,5 x 1,5 cm, nos planos tangenciais e radiais e 2,0 cm no plano transversal. Os corpos-de-prova, para amolecimento, foram levados para o Laboratório de Anatomia da Madeira da UFLA, onde, inicialmente, foram submetidos ao cozimento em água, a  $70^\circ\text{C}$ , por um período de 24 horas.

Entretanto, devido à elevada resistência das amostras à retirada da secção transversal, as mesmas foram levadas ao cozimento em ácido nítrico e água destilada, na proporção 1:10, por 10 minutos.

As secções anatómicas foram feitas com o auxílio de um micrótomo de deslize, com espessuras variando nos planos tangencial e radial de 15 a 19  $\mu\text{m}$  e no plano transversal de 21 a 23  $\mu\text{m}$ .

A descrição microscópica foi realizada mediante as normas da International Association of Wood Anatomists Committee - IAWA Committee (1989). Dessa forma, os caracteres anatómicos foram descritos com o auxílio de um microscópio ótico, com aumento ocular de 10x e objetivas de 2,5 a 100x tendo auxílio de software de análise de imagem Image Pro Plus previamente calibrado.

Para o preparo do material macerado, foi utilizado o método de Franklin (1945), em que se retiraram, com o auxílio de um estilete, fragmentos dos corpos-de-prova que foram colocados em um recipiente de vidro fechado, com capacidade de 20 ml, juntamente com 10 ml de uma solução de ácido acético glacial e peróxido de hidrogênio na proporção 1:1, deixando-se macerar por 48 horas em estufa, à temperatura de 60°C. Em seguida, o macerado foi levado a um processo de decantação com água destilada, para que a substância macerante fosse completamente removida. Para a visualização dos elementos dissociados, adicionou-se safranina hidroalcoólica no macerado, juntamente com água, na proporção 6:1.

Para essa metodologia, foi utilizado um microscópio conectado ao sistema de análise de imagem Image Pro Plus. Seguindo as normas estabelecidas pela IAWA Committee (1989), foram realizadas trinta medições de cada um dos seguintes parâmetros: diâmetro dos vasos (DV), frequência dos vasos (FV), comprimento de fibras (CF) e largura das fibras (LF). A espessura

da parede da fibra (EP) foi calculada pela diferença entre a largura da fibra e o diâmetro do lume, dividida por dois.

#### **4.7 Caracterização química**

A caracterização química foi realizada no Laboratório de Tecnologia da Madeira da UFLA, onde a madeira foi transformada em cavacos e, posteriormente, em serragem, pela ação de um moinho. Em seguida, a serragem foi passada em peneiras sobrepostas de 40 e 60 mesh, tendo sido utilizada somente a fração que ficou retida na peneira de 60 mesh. Feito isso, a serragem foi aclimatizada até estabilização de sua massa.

Após a determinação da umidade da amostra, foram feitas as análises de solubilidade dos extrativos totais em água fria, água quente e solubilidade em álcool-tolueno, conforme norma da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel - ABTCP (1974). Para a determinação do teor de lignina solúvel, empregou-se a mesma metodologia dessa norma que utiliza 1 g a.s. de serragem e 15 ml de ácido sulfúrico, em banho-maria por oito horas.

#### **4.8 Análise dos dados**

Inicialmente, foram realizadas a análise descritiva e a análise de correlação de Pearson entre as características avaliadas nas espécies.

Foram ajustados modelos lineares em que os dados de permeabilidade determinada foram calculados a partir dos valores de permeabilidade estimados pelo modelo de fluxo longitudinal para folhosas. O modelo testado para as regressões foi o linear simples, com o intervalo de confiança de 95% de probabilidade.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Propriedades da madeira de amapá e faveira

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os valores médios e de coeficiente de variação das características químicas, anatômicas e permeabilidade analisadas nas madeiras de amapá e faveira, respectivamente.

Tabela 1 Características químicas e anatômicas da madeira de amapá e valores médios de permeabilidade ao ar e líquido.

Espécie	Características		Média	C.V (%)
Amapá	Química	Teor de extrativos (%)	5,31	17
		Teor de lignina (%)	30,51	1
		Teor de cinzas (%)	0,88	15
		Teor de holocelulose (%)	63,30	2
	Anatômicas	Frequência de vasos (mm <sup>2</sup> )	7,0	6
		Diâmetro dos vasos (µm)	161,0	9
		Comprimento das fibras (µm)	1269	6
		Espessura da parede (µm)	4,7	13
		Largura da fibra (µm)	21,7	17
	Permeabilidade	Ar (cm <sup>3</sup> /cm.atm.s)	64,53	14
			(m <sup>3</sup> /m.(N/m <sup>2</sup> ).s)	
		Líquido (cm <sup>3</sup> /cm.atm.s)	2,1	77
			(m <sup>3</sup> /m.(N/m <sup>2</sup> ).s)	

Tabela 2 Características químicas e anatômicas da madeira de faveira e valores médios de permeabilidade ao ar e líquido.

Espécie	Características		Média	C.V(%)
Faveira	Química	Teor de extrativos (%)	3,52	9
		Teor de lignina (%)	25,08	10
		Teor de cinzas (%)	0,98	16
		Teor de holocelulose (%)	70,42	4
	Anatômicas	Frequência de vasos (mm <sup>2</sup> )	5,7	18
		Diâmetro dos vasos (µm)	217,4	8
		Comprimento das fibras (µm)	1396	10
		Espessura da parede (µm)	3,1	14
		Largura da fibra (µm)	28,5	12
	Permeabilidade	Ar (cm <sup>3</sup> /cm.atm.s)	142,0	44
			(m <sup>3</sup> /m.(N/m <sup>2</sup> ).s)	
		Líquido (cm <sup>3</sup> /cm.atm.s)	3,323	113
(m <sup>3</sup> /m.(N/m <sup>2</sup> ).s)			3,28.10 <sup>-9</sup>	

## 5.2 Características químicas

Como se observa na Tabela 1, o valor médio do teor de extrativos totais na madeira de Amapá foi de 5,3% e coeficiente de variação foi igual a 17%. Estes valores são superiores aos da faveira, que apresentou teor médio de extrativos de 3,5%, com coeficiente de variação de 9%. Barbosa, Nascimento e Moraes (2007), estudando as propriedades antitermíticas de extratos brutos de madeiras e cascas das espécies *Pouteria guianensis* e *Scleronema micranthum*, encontraram teores de extrativos de 2,5% e 4,6% respectivamente. Estes valores, determinados pelos autores para essas espécies provenientes da Amazônia, estão condizentes com os obtidos neste estudo para a faveira e o amapá.

De acordo com Milota et al. (1995) e Silva (2007), o conteúdo de extrativos presente na madeira indica que possivelmente ocorrerá certa barreira à passagem de fluidos, principalmente madeiras provenientes do cerne. Neste caso, pode-se dizer que a madeira do amapá apresenta teores de extrativos que possivelmente dificultam a sua impregnação com preservante ou a sua secagem, quando comparada com a madeira de faveira.

Na Tabela 1, nota-se que o valor médio do teor de lignina na madeira de Amapá foi de 30,51%, com coeficiente de variação de 1%. Na Tabela 2 apresenta-se o valor médio do teor de lignina da madeira de faveira de 25,08%, porém, com coeficiente de variação de 10%.

Estes valores de lignina estão de acordo com os determinados por Miller (1999), Silva (2007) e Sjostrom (1981), segundo os quais os teores de lignina variam de 23% a 33% em madeiras. Silva (2007), estudando teores de lignina nas madeiras de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora* e *Pinus elliottii*, afirma que madeiras com elevados teores de lignina apresentam maior passagem de fluidos. Entretanto, notou-se, neste estudo, que a madeira de faveira apresentou teor de lignina 18% menor e foi mais permeável a fluidos do que a madeira de amapá.

Como se observa nos dados da Tabela 1, o valor médio do teor de cinzas na madeira de Amapá foi de 0,88% e o coeficiente de variação de 15%. Já na Tabela 2 é apresentado um teor médio de cinzas de 0,98%, com coeficiente de variação de 16% para a faveira.

O teor de cinzas traz informações sobre a quantidade de materiais inorgânicos dentro do vegetal. Miller (1999), Mori (2003) e Silva (2007) afirmam que os teores de cinzas situam-se entre 0,2% a 1% da massa seca das madeiras. Em seus estudos entre a relação do teor de cinzas com a permeabilidade da madeira, Silva (2007) cita que um aumento no teor de cinza torna a madeira mais permeável a fluidos. Observa-se um pequeno aumento

deste teor de cinzas na madeira de faveira, o que, possivelmente, responde ao por quê de os valores de permeabilidade ao ar e líquido serem maiores nesta espécie.

Pelos dados da Tabela 1, nota-se que o valor médio do teor de holocelulose na madeira de Amapá foi de 63,30% com coeficiente de variação de 2%. Já a madeira de faveira, como se observa pelos dados da Tabela 2, apresentou teor médio de holocelulose de 70,42%, com coeficiente de variação de 4%. Os valores determinados neste estudo estão condizentes com os obtidos por Browning (1963) que, estudando o teor de holocelulose das madeiras amazônicas de pau-mulato (*Qualea dinizii*), abiurara (*Lucuma dissepala*), breu-branco (*Protium heptaphyllum*) e imbaúba (*Cecropia juranyana*), encontrou valores de 69,3% a 73,8%.

### 5.3 Características anatômicas

Como observado na Tabela 1, o valor médio do número de vasos por  $\text{mm}^2$  na madeira de amapá foi de 7, com diâmetro de vasos médio de  $161\mu\text{m}$ , tendo como coeficientes de variação de 6% e 9% para total de vasos e diâmetro de vasos, respectivamente. Estes valores estão próximos dos resultados obtidos por Mainieri e Chimelo (1989) que, para a madeira de Amapá, encontraram frequência de nove vasos por  $\text{mm}^2$  e diâmetro desses vasos de  $200\mu\text{m}$ .

Na Tabela 2, nota-se que o valor médio do número de vasos por  $\text{mm}^2$  na madeira de faveira foi de 6, com diâmetro de vasos médio de  $217\mu\text{m}$ . O coeficiente de variação para a frequência de vasos foi de 18% e, para o diâmetro desses vasos, de 8%. Détienne e Jacquet (1983) determinaram, para essa espécie, média de dois poros por  $\text{mm}^2$  e diâmetro médio de vasos de  $200\mu\text{m}$ . Dessa forma, os valores encontrados pelos autores para a madeira de faveira são próximos aos observados neste trabalho.

Tanto para a madeira de amapá quanto para a faveira, o total de vasos por  $\text{mm}^2$  e o diâmetro deles são de extrema importância, pois essas características influenciam na impregnação e na secagem da madeira. Cruz (2000) afirma que, quando ocorre redução no total de vasos por  $\text{mm}^2$ , há uma compensação disso pelo aumento do diâmetro desses vasos. No caso da faveira, mesmo tendo o total médio de vasos por  $\text{mm}^2$  menor quando comparado com o Amapá, não se pode afirmar que esta espécie seja resistente à passagem de fluidos, pois, como notado, a faveira tem diâmetro de vasos maior do que o amapá.

Na madeira de amapá, o comprimento médio das fibras, como notado na Tabela 1, foi de 1269  $\mu\text{m}$ , tendo um coeficiente de variação de 6%. O comprimento das fibras determinado neste estudo está próximo ao valor médio encontrado por Mainieri e Chimelo (1989), o qual foi de 1160  $\mu\text{m}$  para a madeira de amapá.

Os dados da Tabela 2 indicam que a faveira possui média de comprimento das fibras de 1396  $\mu\text{m}$ , com coeficiente de variação de 10%. O valor de comprimento das fibras encontrado neste trabalho é menor que os valores obtidos por Loureiro, Silva e Alencer (1979), para a mesma espécie que foi de 1800  $\mu\text{m}$ .

A espessura da parede e a largura da fibra na madeira de amapá, como indicado na Tabela 1, foram de 4,7  $\mu\text{m}$  e 22  $\mu\text{m}$ , com coeficientes de variação de 13% e 17%, respectivamente. Mainieri e Chimelo (1989), estudando a largura da fibra em árvores de amapá, encontraram valores de 23  $\mu\text{m}$ , ou seja, muito próximos aos determinados para a madeira desta espécie neste trabalho.

Nota-se, pelos dados da Tabela 2, que, na madeira de faveira, a espessura da parede e a largura da fibra foram de 3,1  $\mu\text{m}$  e 29  $\mu\text{m}$ , com coeficientes de variação de 3% e 29%, respectivamente. Estes valores são próximos aos determinados por Marques (2008) que, estudando o agrupamento

de 41 espécies de madeiras da Amazônia para secagem, com base em características anatômicas e físicas, encontrou, para a madeira de faveira, valores de espessura de parede de 2,4  $\mu\text{m}$  e largura da fibra de 26,4  $\mu\text{m}$ .

Na avaliação da relação existente entre as características anatômicas, químicas e de permeabilidade da madeira, foi produzida uma matriz de correlação de Pearson. Os valores de correlação para a madeira de Amapá, quanto à faveira, estão apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 Matriz de correlação de Pearson para as características anatômicas e de permeabilidade da madeira de amapá.

Características	CF	EP	LF	PerAr	PerLi	FV
PerAr	0,095	0,134	0,107	1,000	0,457	0,235
PerLq	0,186	0,212	0,545	0,457	1,000	-0,083

EP: espessura da parede; LF: largura da fibra; PerAr: permeabilidade ao ar; PerLq: permeabilidade ao líquido; FV: frequência de vasos; CF: comprimento de fibra.

Nota-se, pela matriz de correlação de Pearson, para a madeira de Amapá, que existe baixa correlação, de 0,545. Verifica-se também que a frequência de vasos por  $\text{mm}^2$  no amapá não influenciou a permeabilidade ao líquido, pois a correlação de -0,083 é baixa. Em geral, as correlações foram baixas, tendo as maiores correlações entre as variáveis sido as de largura de fibra e permeabilidade ao líquido e permeabilidade líquida com permeabilidade ao ar.

Tabela 6 Matriz de correlação de Pearson para as características da madeira de faveira.

Características	CF	EP	LF	PerAr	PerLi	FV
PerAr	0,280	0,181	-0,662	1,000	0,133	-0,099
PerLq	0,300	0,105	-0,113	0,133	1,000	-0,037

EP: espessura da parede; LF: largura da fibra; PerAr: permeabilidade ao ar; PerLq: permeabilidade ao líquido; FV: frequência de vasos; CF: comprimento de fibra.

Para a madeira de faveira, a matriz de correlação de Pearson indicou que existe baixa correlação entre as características permeabilidade ao líquido e permeabilidade ao ar com o comprimento de fibras de 0,300 e 0,280, respectivamente. Verifica-se também que a frequência de vasos por  $\text{mm}^2$  na madeira de faveira não influenciou a permeabilidade ao líquido, pois a correlação de -0,037 é baixa. Nota-se que todas as correlações foram baixas, tendo as maiores encontradas sido permeabilidade ao líquido e comprimento de fibra e permeabilidade ao ar com comprimento de fibra, observando-se que os valores destas correlações não ultrapassaram 0,300.

#### **5.4 Permeabilidade da madeira**

Em relação à permeabilidade no sentido radial, nenhuma amostra, tanto da madeira de amapá como de faveira, apresentou fluxo nos ensaios de permeabilidade ao ar atmosférico e à água destilada. Isso, possivelmente, aconteceu devido às características anatômicas das espécies. De acordo com Lepage (1986), Siau (1971, 1984) e Silva (2007), a translocação de fluidos radialmente só ocorre mediante as pontoações, as quais, para este estudo, são simples e diminutas, o que pode ter impedido a passagem de ar ou líquido.

Pelas características anatômicas das espécies analisadas, pode-se dizer que dois fatores podem ter influenciado os resultados da passagem de ar e líquido no sentido transversal às fibras. São eles:

a) composição celular dos raios: observou-se que ambas as espécies apresentaram raios com corpo constituído, predominantemente, por células do tipo procumbentes. Esse tipo de parênquima radial apresentou pequenas dimensões e frequência elevada em relação às células quadradas ou eretas. No entanto, como as permeabilidades ao ar e ao líquido das duas espécies foram diferentes, possivelmente esta característica não influenciou de forma

significativa a permeabilidade da madeira, tendo em vista que a maioria dos raios é constituída, predominantemente, por células procumbentes;

b) contato entre pontoações e passagem de feixes fibrosos: no sentido radial, entre as células de parênquima radial, observaram-se os pares de pontoação normalmente interligados simples e relativamente grandes, porém, não havendo ou sendo raros os casos de presença de pontoações do tipo raio-fibra. Sendo assim, a passagem de ar e água também ficaria inviabilizada em pontos no sentido radial onde passam feixes de fibras.

c) Vale ressaltar que a permeabilidade ao ar e ao líquido, no sentido radial, pode ser determinada, mas, de acordo com Siau (1984), são valores extremamente pequenos e, muitas vezes, a dificuldade experimental e as características anatômicas das espécies podem impedir a medição de permeabilidades extremamente baixas.

#### **5.4.1 Permeabilidade ao ar**

Nota-se, pelos dados da Tabela 1, que o valor médio de permeabilidade ao ar na madeira de Amapá foi de  $63,7.10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$ , com coeficiente de variação de 14%. Este valor de permeabilidade é superior aos encontrados por Magalhães (2004) que, ao estudar a permeabilidade ao ar no sentido longitudinal de madeira maciça de *Pinus elliotti* Engelm var. *elliottii*, submetida à compressão paralela às fibras, encontrou valores em torno de  $23,7.10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$ . Também Rice e Onofrio (1996), calculando a permeabilidade longitudinal para a madeiras de *Pinus strobus*, encontraram valor médio de  $22,5.10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$ . Entretanto, Silva (2007), estudando a permeabilidade do cerne da madeira de *Eucalyptus grandis*, obteve dados em torno de  $30,6.10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$ . Sendo assim, pode-se dizer que os valores de permeabilidade ao

ar para a madeira de amapá estão maiores que os descritos na literatura para outras madeiras.

Vale ressaltar que os valores de permeabilidade para a madeira de amapá apresentados neste estudo também podem estar sofrendo a influência da característica anatômica, que é um dos fatores que afetam a permeabilidade da madeira a fluidos. Segundo Siau (1988), tamanho, distribuição e números de elementos condutores e, principalmente, a presença e a intensidade de obstruções dessas estruturas anatômicas atuam consideravelmente entre diferentes espécies.

Já na Tabela 2, para a madeira de faveira, foi determinado o valor médio de permeabilidade de  $140,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$  e coeficiente de variação de 44%. Milota et al. (1995), estudando a permeabilidade ao gás de madeira de *Pinus taeda* no sentido longitudinal, encontraram valor mínimo de  $314,8 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$ , ou seja, maior que os dados obtidos neste estudo para a madeira de faveira.

Os valores de permeabilidade ao ar para a faveira, determinados nesta pesquisa, também estão de acordo com os dados obtidos por Silva (2007) que, estudando a permeabilidade ao ar no sentido longitudinal para a madeira de *Pinus elliottii*, encontrou valores em um intervalo de  $119,4 \cdot 10^9$  a  $156,9 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$ .

Era esperado que a madeira de faveira apresentasse valores de permeabilidade ao ar elevados, pois, segundo os trabalhos de Milota et al. (1995), Siau (1984) e Silva (2007) e o conteúdo de extrativos presente na madeira atua como barreira natural à passagem de ar, principalmente quando presente no cerne. E, como o teor de extrativos no amapá foi de 5,3% e, na faveira, de 3,5%, possivelmente, no Amapá, os extrativos influenciaram os valores de permeabilidade ao ar.

O amapá ainda apresentou vasos obstruídos por tilos (Figura 8) e a madeira da faveira também os possui, porém, com diâmetros maiores que  $217,1\mu\text{m}$ , o que, possivelmente, explica valores de permeabilidade ao ar mais elevados na faveira do que no amapá.

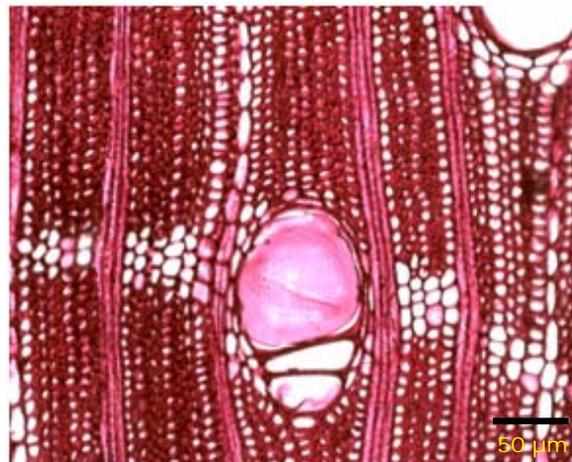


Figura 8 Corte transversal da madeira de amapá, apresentando vasos obstruídos por tilose.

A madeira de amapá apresentou espessura de parede da fibra de  $4,7\mu\text{m}$ , ou seja, maior do que a da faveira, que foi de  $3,1\mu\text{m}$ . Isso poderia ser um fator a contribuir para os valores de permeabilidade encontrados. Entretanto, não é possível afirmar, neste estudo, que a espessura da parede esteja influenciando a permeabilidade em ambas as espécies.

#### 5.4.2 Permeabilidade ao líquido

Na Tabela 1 observa-se o valor médio de permeabilidade ao líquido na madeira de amapá igual a  $2,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$ , com alto coeficiente de variação de 77%. Estes valores são menores do que os apresentados na Tabela 2

para a madeira de faveira, que tem teor médio de permeabilidade ao líquido de  $3,28 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$  e coeficiente de variação de 113%. Os elevados valores de coeficiente de variação encontrados no amapá e faveira podem ser explicados pela característica dos indivíduos coletados, que eram oriundos de uma floresta natural, o que induz à formação de indivíduos mais heterogêneos entre si.

Silva (2007) cita que esse tipo de ensaio tem limitações de uso e, neste caso, utilizando-se a água destilada, a mesma irá se unir ao material madeira rapidamente, reduzindo drasticamente a vazão do líquido pelo material. Isso ocorre, segundo Siau (1971, 1988), devido ao fato de a madeira ser um material higroscópico, tendo muita afinidade pela água. Tal situação foi observada durante a execução deste trabalho, o que também, possivelmente, contribui para explicar os baixos valores de permeabilidade ao líquido encontrados para ambas as espécies.

Outra explicação está associada a características anatômicas das madeiras de amapá e faveira. Estas espécies têm vasos obstruídos por tilose, bem como uma quantidade baixa de vasos por  $\text{mm}^2$ , o que pode ter acarretado poucos caminhos para o fluxo pela água. Já a madeira de faveira, mesmo tendo diâmetros de vasos maiores do que o amapá, também apresentou baixos valores de permeabilidade, causados, possivelmente, pelas tilose no seu interior. De acordo com Klitzke (2003), a translocação de líquidos em folhosas é muito afetada pelo efeito dos poros, os quais podem apresentar tilos, que são barreiras naturais e, novamente neste trabalho, constatou-se a presença de tilose.

Outra resposta sobre os baixos valores de permeabilidade ao líquido encontrados em ambas as espécies deve-se à presença elevada de extrativos que foram de 5,31%, para o amapá e 3,52%, para a faveira (Tabelas 1 e 2), ficando, no caso do amapá, acima dos teores de extrativos para madeiras de folhosas descritos por Browning (1963) de 2% a 4%. Os extrativos são, de acordo com Jankowsky (1979), barreiras naturais no interior da madeira, principalmente no

cerne, ao fluxo de líquidos. Segundo Wangaard e Granados (1967), os extrativos também podem ser de natureza higroscópica, ocorrendo, assim, redução na passagem da água. Possivelmente, os extrativos presentes nas madeiras de amapá e faveira são de caráter higroscópico, entretanto, outros estudos precisam ser realizados para confirmar tal hipótese, visto que isso não faz parte dessa pesquisa.

Como a madeira de faveira apresentou valores de permeabilidade ao ar e ao líquido superiores ao amapá, possivelmente esta espécie é mais permeável a preservantes químicos e remoção de água durante o processo de secagem e colagens.

### **5.5 Modelo de fluxo longitudinal para folhosas**

Nas Figuras 9, 10, 11 e 12 são apresentados os valores estimados pela Equação 16, com os valores calculados de permeabilidade ao ar e ao líquido, para a madeira de amapá e faveira, respectivamente.

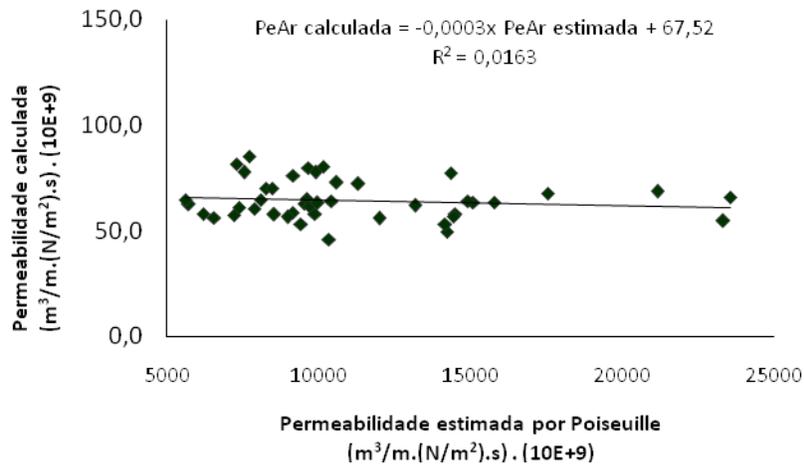


Figura 9 Ajuste da permeabilidade ao ar, calculada em função da permeabilidade ao ar estimada pela equação de Poiseuille (SIAU, 1971), para a madeira de amapá.

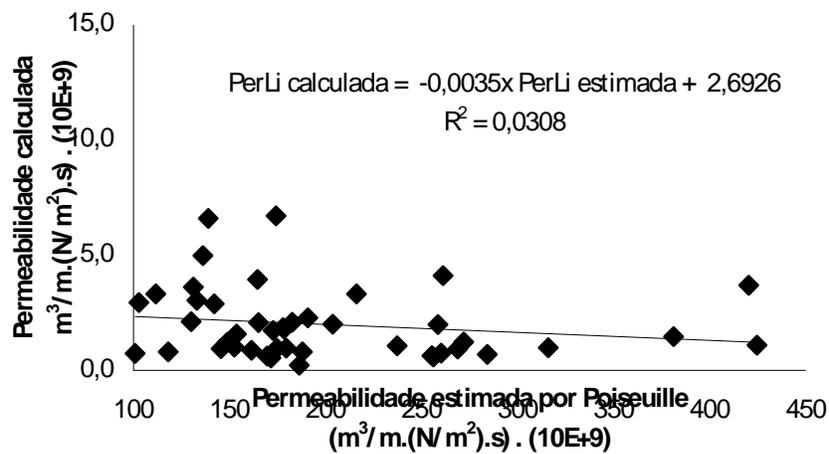


Figura 10 Ajuste da permeabilidade ao líquido, calculada em função da permeabilidade ao líquido estimada pela equação de Poiseuille, (SIAU, 1971) para a madeira de amapá.

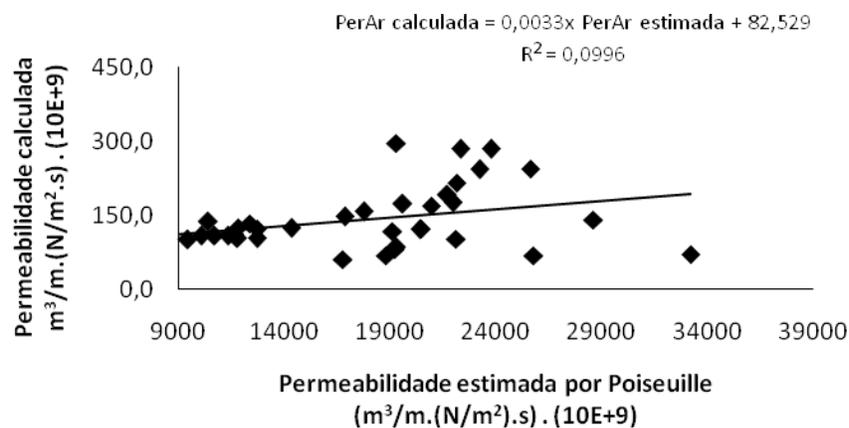


Figura 11 Ajuste da permeabilidade ao ar, calculada em função da permeabilidade ao ar estimada pela equação de Poiseuille (SIAU, 1971), para a madeira de faveira.

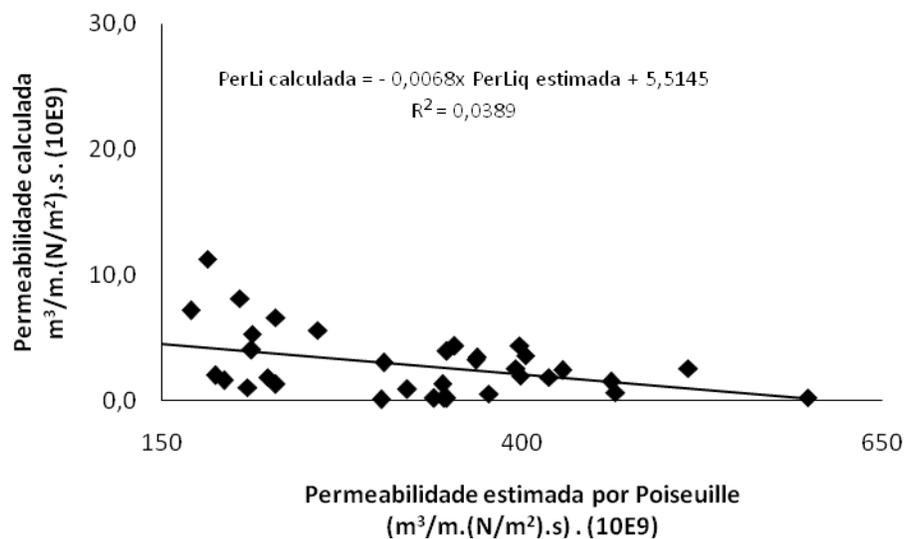


Figura 12 Ajuste da permeabilidade ao líquido, calculada em função da permeabilidade ao líquido estimada pela equação de Poiseuille (Siau, 1971), para a madeira de faveira.

Nota-se, nas Figuras 9 e 10, que, para a madeira de Amapá, o ajuste linear encontrado apresentou coeficiente de determinação baixo, tanto para a permeabilidade ao ar atmosférico, que foi de 0,0163, quanto para a permeabilidade ao líquido, que foi de 0,0308.

Pelo gráfico da Figura 11, observa-se que o ajuste linear, para a madeira de faveira, apresentou também baixo coeficiente de determinação, ou seja, 0,0996, para a permeabilidade ao ar calculada neste trabalho, em função da permeabilidade ao ar estimada pela expressão de Poiseuille. Já na Figura 12, para faveira, observa-se também baixo coeficiente de determinação de 0,0389, quando se comparam os valores de permeabilidade ao líquido, calculados com os valores estimados pela expressão de Poiseuille.

A baixa correlação entre os valores de permeabilidade calculados para o ar e o líquido, quando comparada aos valores estimados pela expressão de Poiseuille para as madeiras de amapá e faveira, explica-se, possivelmente, devido ao fato de o modelo de fluxo longitudinal para folhosas descrito por Siau (1971) considerar que a madeira possua os vasos capilares abertos ao longo de todo o seu comprimento, o que não acontece. De acordo com Siau (1971, 1984), o grande diâmetro dos vasos faz o escoamento através das fibras e do parênquima longitudinal ser insignificante, negligenciado, assim, estes caminhos. Este modelo presume que a permeabilidade da madeira de folhosa, a qualquer fluido, é dependente somente da frequência e dos raios dos vasos, bem como da viscosidade do fluido.

Outro fator que pode estar contribuindo para a não aplicação do modelo de fluxo longitudinal para as folhosas descrito por Siau (1971) é que, nas madeiras de amapá e faveira, foram observados tiloses, as quais podem estar obstruindo parcialmente ou totalmente os vasos. De acordo com Siau (1971, 1988) e Silva (2007), as tiloses diminuem, gradualmente, a permeabilidade da madeira.

Como o modelo de fluxo longitudinal para folhosas descrito por Siau (1971), neste caso utilizado para estimar a permeabilidade ao ar e líquido do amapá e faveira, não se ajustou pelo fato de esse modelo não levar em consideração que os vasos estejam obstruídos por tilose ou a presença de extrativos na madeira, é necessário que mais estudos sejam realizados, a fim de testar outros modelos que, além de considerar a frequência, os raios dos vasos e a viscosidade do fluido, considerem também, para as folhosas tropicais, a frequência de tilose por  $\text{cm}^2$  e a quantidade de extrativos presentes na madeira.

## 6 CONCLUSÃO

Deste estudo pode-se concluir que:

a) a permeabilidade ao ar no sentido longitudinal da madeira de amapá foi de  $63,7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$ ;

b) na madeira de amapá a permeabilidade ao líquido no sentido longitudinal foi de  $2,07 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$ ;

c) a permeabilidade ao ar no sentido longitudinal na madeira de faveira foi de  $140,210^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$ ;

d) a madeira de faveira apresentou permeabilidade ao líquido no sentido longitudinal de  $3,28 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$ ;

e) para ambas as espécies não ocorreram fluxo de ar e líquido no sentido radial;

f) para a madeira de amapá, a matriz de correlação de Pearson indicou baixos valores de correlação entre a permeabilidade ao ar e as características anatômicas comprimento das fibras (0,095), espessura da parede (0,134) e largura da fibra (0,107);

g) a matriz de Pearson indicou, para a madeira de amapá, baixos valores de correlações entre a permeabilidade ao líquido e as características anatômicas comprimento das fibras (0,186), espessura da parede (0,212), largura da fibra (0,545) e frequência de vasos (0,235);

h) ocorreram baixas correlações na matriz de Pearson para a madeira de faveira entre a permeabilidade ao ar e as características anatômicas comprimento das fibras (0,280) e espessura da parede (0,181);

i) para a madeira de faveira, a matriz de correlação de Pearson indicou baixos valores de correlação entre a permeabilidade ao líquido e as características anatômicas comprimento das fibras (0,300) e espessura da parede (0,105);

j) o modelo longitudinal para folhosas superestimou, em 175 vezes, os valores de permeabilidade ao ar e ao líquido da madeira de amapá;

k) para a madeira de faveira, o modelo longitudinal para folhosas superestimou em 145 vezes os valores de permeabilidade ao ar e ao líquido.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Normas ABTCP**. São Paulo, 1974. 18 p.

BARBOSA, A. P.; NASCIMENTO, C. S.; MORAIS, J. W. Estudos de propriedades antitermíticas de extratos brutos de madeira e casca de espécies florestais da Amazônia Central, Brasil. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 37, n. 2, p. 213-218, 2007.

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

BOLTON, A. J. A reexamination of some deviations from Darcy's law in coniferous wood. **Wood Science and Technology**, New York, v. 22, n. 4, p. 311-322, Dec. 1988.

BRAMHALL, G. The validity of Darcy's law in the axial penetration of wood. **Wood Science and Technology**, New York, v. 5, n. 2, p. 121-134, June 1971.

BRANDÃO, A. T. O. **Determinação de metodologia para a indicação de programas de secagem de madeiras**. 1989. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1989.

BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. New York: J. Wiley, 1963. 689 p.

CAVALCANTE, A. R. **Ocorrência do colapso na secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna***. 1991. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1991.

CHOONG, E. T.; MCMILLIN, C. W.; TESORO, F. O. Effect of surface preparation on gas permeability of wood. **Wood Science**, London, v. 7, n. 4, p. 319-322, 1975.

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

\_\_\_\_\_. Longitudinal permeability of green eastern hemlock. **Forest Products Journal**, Madison, v. 15, n. 10, p. 441-449, 1965.

\_\_\_\_\_. Longitudinal permeability of wood to gases and nonswelling liquids. **Forest Products Journal**, Madison, v. 17, n. 10, p. 41-46, 1967.

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.

CRUZ, C. R. **Caracterização da madeira de clones de Eucalyptus para a utilização na indústria madeireira**. 2000. 64 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

DÉTIENNE, P.; JACQUET, P. **Atlas d'identification des bois de l'amazone et des régions voisines**. Paris: Centre Technique Forestier Tropical, 1983. 640 p.

ESAU, K. **Anatomy of seed plants**. New York: J. Wiley, 1960. 376 p.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison: U. S. Department of Agriculture, 1999. 463 p.

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.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS COMMITTEE. List of microscope features for hardwood identification. **IAWA Bulletin New Series**, Leiden, v. 10, n. 3, p. 219-332, 1989.

JANKOWSKY, I. P. **Influência da densidade básica e do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira**. 1979. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1979.

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

- KLITZKE, R. J. **Secagem da madeira**. Curitiba: UFPR, 2003. 98 p.
- KLOCK, U. et al. **Química da madeira**. 3. ed. Curitiba: UFPR, 2005. 86 p.
- KOLLMANN, F. P.; COTÉ, W. A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1968. v. 1, 592 p.
- KOLLMANN, F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1975. v. 2, 703 p.
- LEPAGE, E. S. et al. **Manual de preservação de madeiras**. 2. ed. São Paulo: IPT, 1986. 708 p.
- LOUREIRO, A. A.; SILVA, M. F.; ALENCAR, J. C. **Essências madeireiras da Amazônia**. 2. ed. Manaus: INPA, 1979. v. 1, 245 p.
- MAGALHÃES, W. L. E. Tratamento mecânico visando o aumento da permeabilidade em madeira de *Pinus elliottii* Engelm Var.elliotti. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: UFMG, 2004. 1 CD-ROM.
- MAINIERI, C.; CHIMELO, J. P. **Fichas de características das madeiras brasileiras**. São Paulo: IPT, 1989. 420 p.
- MARQUES, M. H. B. **Agrupamento de 41 espécies de madeiras da Amazônia para secagem baseado em características anatômicas e físicas**. 2008. 125 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- MILLER, R. B. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison: Forest Products Laboratory, 1999. 463 p.
- 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.
- MORI, F. A. Utilização de eucaliptos e de madeiras nativas no armazenamento da aguardente de cana-de-açúcar. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 23, n. 3, p. 396-400, 2003.
- PEREIRA, J. C. D. et al. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2000. 113 p. (Documentos, 38).

PONCE, R. H.; WATAI, L. T. **Manual de secagem da madeira**. Brasília: STI/IPT, 1985. 70 p.

RICE, R. W.; ONOFRIO, M. Longitudinal gas permeability measurements from Eastern white pine, Red Spruce, and Balsam Fir. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 28, n. 3, p. 301-308, Sept. 1996.

SANTOS, A. S. **Caracterização química e tecnológica de taninos da casca das leguminosas florestais *Mora paraensis* Ducke e *Stryphnodendron guianense* (Aubl.) Benth.** 2008. 79 p. Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestais e Ambientais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2008.

SEARS, F. W.; ZEMANSKY, M. W. **University physics part 1: mechanics, heat and sound**. 4. ed. New Jersey: A. Wesley, 1970. 330 p.

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

\_\_\_\_\_. **Transport processes in wood**. New York: Springer Wood Science, 1984. 245 p.

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.

SILVA, M. R. et al. Proposta de um equipamento para determinação da permeabilidade em madeiras brasileiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10., 2006, São Pedro. **Anais...** São Pedro: USP, 2008. 1 CD-ROM.

SJOSTROM, S. **Wood chemistry: fundamentals and applications**. London: Academic, 1981. 223 p.

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

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.

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.

ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**. 2003. 103 p. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.