

AS RELAÇÕES ÁGUA-MADEIRA E SUA INFLUÊNCIA NAS SUAS PROPRIEDADES FÍSICAS¹

The Wood-Water Relations and its Influence on Their Physical Properties

Luiz Carlos Couto² e Daniel Camara Barcellos³

Resumo: Este documento tem como objetivo definir e explicar as principais propriedades físicas da madeira. Três características são fundamentais para distinguir a substância madeira de outros materiais. A primeira delas é sua heterogeneidade, que é decorrente, entre outros, de sua origem vegetal. Deve-se ressaltar que apesar de as espécies terem muitas características em comum não existem duas peças de madeira exatamente iguais, mesmo se oriundas de uma mesma espécie. A segunda se refere à sua higroscopicidade, que lhe confere a propriedade de ajustar o seu teor de umidade às condições higrométricas ambientes. Suas dimensões, sua densidade e seu comportamento mecânico e viscoelástico são substancialmente afetados por ela. Em terceiro lugar, a madeira é um material anisotrópico, o que significa dizer que suas propriedades diferem segundo a orientação considerada (direção longitudinal, longitudinal radial e longitudinal tangencial). Portanto, torna-se necessário conhecer esse comportamento, em vista de sua transformação racional. O teor de umidade, a densidade e a retratibilidade serão primeiramente apresentadas e, em seguida, discutidas.

Palavras-chave: umidade, densidade e retratibilidade da madeira.

Abstract: This document aimed to define and explain the main physical properties of wood. Three features are essential to distinguish the wood substance from other materials. It should be noted that although the species have many characteristics in common there are not two pieces of wood exactly alike, even if they come from the same sort. The second refers to its hygroscopicity, which gives the wood the property to adjust its moisture content to the environmental hygrometric conditions. The wood size, density and its mechanical and viscoelastic behavior are substantially affected by the hygroscopicity. Third, the wood is an anisotropic material, which means its properties differ depending on the considered direction (longitudinal direction, longitudinal radial and longitudinal tangential). Thus, it is necessary to understand this behavior, considering the wood rational transformation. The wood moisture content, density and shrinkage will be first presented and then discussed.

Keywords: moisture, density and shrinkage of wood.

¹ Recebido para publicação em 25.10.2011 e na forma revisada em 22.12.2011.

² Engenheiro Florestal, Ph.D., Professor da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, Rua Moacir Coelho, 126/202 – Bairro Bom Jesus, 39100-000 Diamantina-MG, <luiz.couto@ufvjm.edu.br>, Diretor Científico da RENABIO, <luizcarlos@renabio.org.br>. ³ D. Sc., Ciência Florestal, Energia da Madeira, UNIPAC Bom Despacho, <daniel@barcelloscamara.com.br>. Diretoria e Gestão, Barcellos & Camara BioEnergia, Av. Carlos Cardoso de Carvalho, 395 – São José, 35600-000 Bom Despacho-MG, Brasil, <www.barcelloscamara.com.br>.

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material composto, de natureza higroscópica, cujo comportamento mecânico é ortotrópico, dependendo consideravelmente da espécie, de sua organização celular, da idade do material, de seu teor de umidade, de sua retratibilidade, de sua densidade, entre outros (MEITE et al., 2007).

Em razão de sua grande disponibilidade e por suas qualidades particulares, a madeira se mostra apta para diferentes aplicações, entre as quais na construção civil, seja devido às suas qualidades como material estrutural ou pelas suas virtudes como material isolante (baixa condutibilidade térmica (LAMINE, 2010). Além de ser um recurso natural renovável, sua resistência mecânica é relativamente elevada, e do ponto de vista estético é bastante apreciada e procurada para diversos usos (ROWELL; BANKS, 1985).

Do ponto de vista químico ela é uma substância complexa, em cuja composição encontram-se polímeros elaborados por um organismo vivo – a árvore, a partir da fotossíntese (HUSSON, 2009). Rowell e Banks (1985) relatam que a parede celular é constituída de polímeros contendo hidroxilas e outros grupos oxigenados, que se ligam às moléculas de água por meio de pontes de hidrogênio. Ao microscópico constata-se que a madeira é formada por um conjunto de células que podem atingir cerca de 10 a 14 bilhões em apenas 1,0 pé cúbico, o que equivaleria a cerca de 350 a 500 bilhões de células por metro cúbico. Essas são ligadas entre si de diversas maneiras, para formar uma massa sólida que se denomina “madeira”. O exame microscópico deste material revela que as células das espécies conhecidas como resinosas ou coníferas (*softwoods*) diferem substancialmente daquelas de espécies folhosas (*hardwood*) (BENABDALLAH, 2006).

Considerando uma de suas características, ou seja, sua higroscopicidade, é que se pretende discutir sua interação e seus efeitos em algumas propriedades físicas da madeira, em

particular a umidade, a retratibilidade e sua massa volúmica ou densidade. Com este propósito, pretende-se fornecer subsídios para orientar sua utilização de forma mais adequada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A umidade na madeira

A quantidade de água presente na árvore viva varia consideravelmente entre as diferentes espécies, assim como também se se trata de madeira de cerne, de alburno, ou madeira de lenho inicial e tardio. Ela varia também com a relação entre a massa e o volume de madeira bruta (ALTEYRAC, 2005). Para as espécies consideradas de densidade média (0,50 a 0,72 g cm⁻³), o conteúdo de umidade da madeira pode ultrapassar o dobro de sua massa absolutamente seca, e no caso das espécies consideradas muito leves (densidades < 0,50 g cm⁻³) (IBDF/DPq-LPF, 1988) o teor de umidade da madeira poderá atingir cerca de oito vezes a sua massa absolutamente seca (CECH; PFAFF, 1980). Conforme relatado por Goulet (1980), o teor de umidade na madeira de balsa (*Ochroma lagopus* e *Ochroma pyramidalis*) poderá atingir valores da ordem de 600%. Essas duas espécies são as que ostentam os menores valores de massas volúmicas básicas (0,10 a 0,13 g cm⁻³). Na árvore viva existe mais água no alburno do que no cerne, e nas espécies oriundas de regiões temperadas o tronco poderá conter mais água na primavera do que no inverno (CECH; PFAFF, 1980).

2.2 Teor de equilíbrio higroscópico

Quando uma prancha de madeira é submetida à secagem em condições atmosféricas de temperatura e umidade relativa constantes, a pressão de vapor de umidade da madeira decresce gradualmente, reduzindo as forças que impelem a perda de umidade de sua superfície para o ar atmosférico. Nesse instante ocorre igualdade entre as pressões de vapor da superfície da prancha e do ar ambiente. Todavia, a

madeira (ex. prancha) apresenta ainda um gradiente de umidade, o que significa apresentar uma superfície mais seca, embora ocorra ainda difusão de umidade do interior para o exterior da prancha. Decorrente desse fenômeno, a pressão de vapor da superfície da prancha aumenta e certa quantidade de umidade se difunde para o ar ambiente novamente. O interior da madeira continua a secar até o momento em que a umidade seja repartida uniformemente através da madeira e a pressão de vapor da umidade no interior da madeira seja igual à pressão de vapor do ar ambiente. Nesse momento, atingiu-se o que se denomina de teor de umidade de equilíbrio higroscópico, quando a madeira não absorve (adsorção) e nem perde (desorção) umidade, a uma umidade relativa e temperatura consideradas (CECH; PFAFF, 1980). Se essas condições mudam, a umidade da madeira mudará, para entrar novamente em equilíbrio higroscópico nessas condições (SALLENAVE, 1955). As condições higrométricas do ar ao longo do ano variam de região para região. Assim é esperado que no Norte do Brasil e na Região Centro-Oeste haja diferenças significativas no teor de umidade de equilíbrio para peças de madeira de uma mesma espécie expostas nessas condições distintas. O comportamento higroscópico da madeira é uma de suas mais importantes particularidades, quando comparado com o de outros materiais de construção. Portanto, torna-se necessário definir seu estado higrométrico com precisão (HUSSON, 2009).

2.3 Formas de água na madeira

A água está presente na madeira sob três formas:

- Água livre ou de capilaridade, que se encontra nos espaços submicroscópicos da parede celular e nas cavidades ou lúmens de células. A água livre, por estar submetida a pressões capilares, distingue-se da água líquida ordinária.
- Água ligada ou água de impregnação adsorvida, que se encontra impregnando as paredes celulares. As moléculas de água ligada são adsorvidas por grupos hidroxilas que se situam nas macromoléculas de polioses, de celulose e na de lignina em menor grau.
- Água de constituição química, que participa da composição química das membranas celulares.

Quanto maior a dimensão das células, mais delgadas serão suas paredes celulares, conseqüentemente a árvore poderá conter maior teor de umidade. Uma vez abatida, a árvore tem seu teor de umidade significativamente reduzido em pouco tempo, passando, por exemplo, de 100-150% a 25-35%. A madeira serrada, quando submetida à secagem natural em um hangar ou galpão, poderá atingir teor de umidade da ordem de 13 a 17% em cerca de quatro meses. Em alguns países a madeira serrada é considerada comercialmente seca quando seu teor de umidade é da ordem de 22%, entretanto ela não estaria apropriada para determinadas utilizações, por exemplo, para fabricação de móveis (HUSSON, 2009). As Figuras 1 e 2 ilustram a evolução da perda de umidade da madeira (galhos 185 e 146 amostras, respectivamente) de cinco espécies canadenses (sapin – *Abies balsamea* (0,335 g cm⁻³), épinette – *Picea glauca* (0,354 g cm⁻³), tremble – *Populus tremuloides* (0,374 g cm⁻³), érable – *Acer saccharum* (0,597 g cm⁻³) e bouleau – *Betula papyrifera* (0,506 g cm⁻³).

As Figuras 1 e 2 mostram, respectivamente, que para um período de secagem equivalente a um mês ao ar livre após o abate o teor de umidade variou entre 20 e 40%, com um teor médio de umidade para todas as espécies da ordem de 31% (Figura 1). Para o período de três meses de secagem esse valor variou de 25 a 35%, com um teor médio para o conjunto de espécies da ordem de 29% (Figura 2). Constatase igualmente que os maiores teores de umidade foram observados para os galhos de

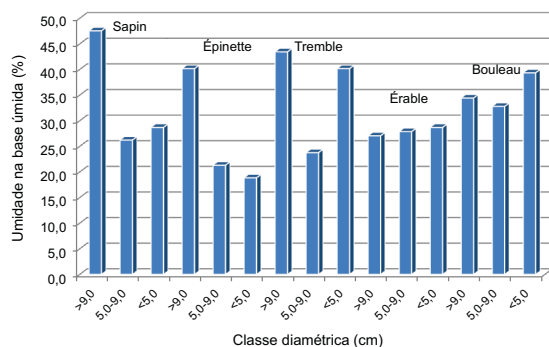


Figura 1 - Teor de umidade na base umidade para espécies canadenses após um mês de secagem ao ar livre (adaptado de SUZHOU, 2011).

Figure 1 - Moisture content based on moisture for Canadian species after one month of air drying (adapted from SUZHOU, 2011).

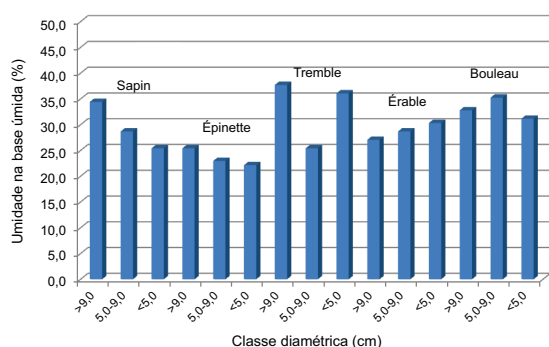


Figura 2 - Teor de umidade na base umidade para espécies canadenses após quatro meses de secagem ao ar livre (adaptado de SUZHOU, 2011).

Figure 2 - Moisture content based on moisture for Canadian species after four months of air drying (adapted from SUZHOU, 2011).

maior diâmetro (>9,0 cm), para os dois períodos de secagem em estudo. A Figura 1, por sua vez, mostra com maior evidência a influência da densidade básica da madeira em seu teor de umidade inicial (um mês após a remoção das amostras), ou seja, quanto menor o valor desta propriedade física, maior deverá ser a expectativa de teores iniciais de umidade significativamente mais elevados. Em efeito, a densidade básica do sapin é $0,335 \text{ g cm}^{-3}$, enquanto a da épinette é de $0,354 \text{ g cm}^{-3}$ e a do

tremble equivale a $0,374 \text{ g cm}^{-3}$ (BEAUDOIN, 2006).

2.4 Ponto de saturação das fibras

Os espaços vazios das paredes celulares de uma madeira considerada no estado verde são preenchidos por água livre. Ela se perde progressivamente pela secagem natural por evaporação, sem que a madeira sofra retratibilidade ou deformações: esta é a fase denominada de “embebição”. As cavidades da matéria lenhosa perdem uma parte da água na fase líquida, com a imediata formação de um menisco e de uma fase vapor. Quando não há mais água na fase líquida nas cavidades celulares, mas as paredes celulares estão ainda saturadas com água de impregnação adsorvida (ligada), o ponto de saturação das fibras é atingido (PSF). O PSF, que situa por volta de 30% para todas as espécies, é considerado o limite abaixo do qual se manifesta o “jogo da madeira”, expressão também conhecida por “nervosidade da madeira”, que representa o limite abaixo do qual o fenômeno da retratibilidade da madeira se manifesta (HUSSON, 2009). Abaixo do PFS ocorre aumento significativo de suas propriedades mecânicas (BEDOIN, 1996). A Figura 3 ilustra as três formas de água na madeira.

Em função da umidade do ar ambiente, dependendo dos parâmetros associados temperatura/umidade relativa, a madeira se estabiliza à umidade de equilíbrio higroscópico. A adsorção das moléculas de água pelos grupos hidroxilas é considerada uma reação exotérmica, que gera calor. Por outro lado, para secar a madeira é necessário um aporte de energia. A energia necessária para evaporar uma molécula de água livre é menor do que a quantidade de energia necessária para evaporar uma molécula de água ligada à madeira. Dessa forma, a água livre na madeira se evapora antes da água de impregnação adsorvida. A água ligada ou água de impregnação adsorvida, de acordo com Husson (2009), representa um quarto do estado termodinâmico, conforme ilustra a Figura 4.

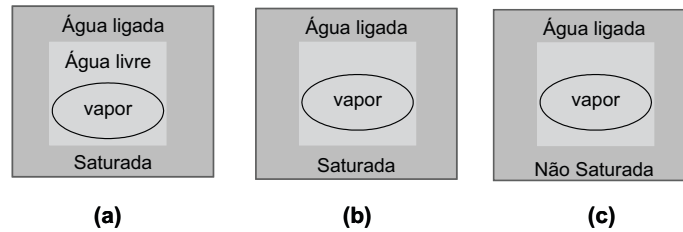
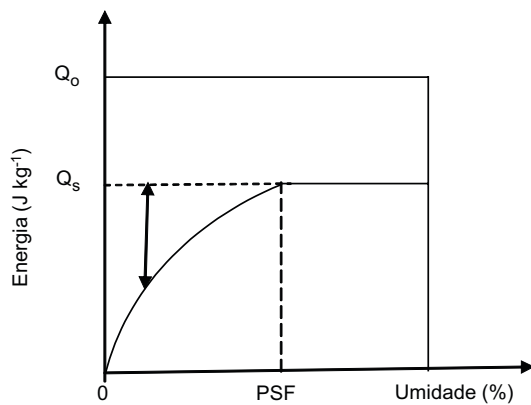


Figura 3 - Representação esquemática das formas de água na madeira: (a) acima do PSF, (b) no PSF e (c) abaixo do PSF (adaptado de HUSSON, 2009).

Figure 3 - Schematic representation of forms of water in the wood: (a) above the FSP (fiber saturation), (b) on FSP and (c) below the FSP (adapted from HUSSON, 2009).



em que: (Q_0) representa a energia necessária para evaporar a água livre - ela é constante com o teor de umidade da madeira e equivale a $2,38 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$; e (Q_s) energia necessária para remover a água de impregnação adsorvida (ligada). Seu valor é fortemente influenciado pelo teor de umidade - ela varia de $0,0 \text{ J/kg}$ no PSF a $1,17 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ para a madeira absolutamente seca.

Figura 4 - Energia de desorção de umidade da madeira (adaptado de HUSSON, 2009).

Figure 4 - Energy of desorption of moisture from the wood (adapted from HUSSON, 2009).

2.5 Teor de umidade da madeira

O teor de umidade da madeira ou o seu estado higrométrico, de acordo com Husson (2009), é caracterizado para o teor em água que corresponde à relação entre a massa de água livre e a água de saturação e a massa anidra ou absolutamente seca da madeira, conforme ilustra a equação 1:

$$U(\%) = \frac{\text{Massa (água livre + água de saturação)}}{\text{Massa absolutamente seca}} \times 100 \quad (\text{eq. 1})$$

Considerando que a madeira é um material fortemente higroscópico, ela conterá sempre em seu interior a água sob diferentes formas (Figura 1). Por essa razão e pelo fato de ser utilizada em diferentes cadeias produtivas, seu teor de umidade, em geral, se define de maneiras diferentes: 1) teor de umidade em relação à massa anidra ou absolutamente seca ($U\%$) e 2) teor de umidade em relação à massa úmida ou bruta ($X\%$) (GOULET 1980; BEAUDOIN 1996), que podem ser representados, respectivamente, pelas equações de 2 a 5:

$$U(\%) = \frac{\text{Massa de água}}{\text{Massa absolutamente seca}} \times 100 \quad (\text{eq. 2})$$

$$U(\%) = \frac{Mu - Mo}{Mo} \times 100 \quad (\text{eq. 3})$$

$$X(\%) = \frac{\text{Massa de água}}{\text{Massa úmida total}} \times 100 \quad (\text{eq. 4})$$

$$X(\%) = \frac{Mu - Mo}{Mu} \times 100 \quad (\text{eq. 5})$$

em que Mu = massa do corpo-de-prova na condição úmida; e Mo = massa do corpo-de-prova na condição anidra ou absolutamente seca.

A condição anidra ou absolutamente seca é aquela que resulta de uma dessiccação do corpo-de-prova a $102 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ até a constância de

massa. Esta condição é praticamente normatizada à escala internacional; ela serve, assim, para padronizar outros modos de determinação da umidade no interior da madeira. Estabeleceu-se que a umidade que permanece ainda no interior do corpo-de-prova não ultrapassa 0,5% (U). Todavia, essa técnica por dessiccação, ainda que considerada precisa e universal, deverá ser conduzida com o cuidado que se requer quando os corpos-de-prova utilizados são provenientes de espécies contendo elevadas quantidades de substâncias voláteis, considerando que uma parte destas será removida pelo vapor d'água durante a secagem dos respectivos corpos-de-prova, sobretudo para temperaturas próximas de 100 °C; é o caso, por exemplo, dos *Pinus*, que podem conter até 25% de resinas. Nesse caso, seria recomendável utilizar o processo de destilação, de preferência em toluol, para determinar diretamente a quantidade de água (massa de água) contida dentro da amostra (GOULET, 1980). As definições precedentes estão ligadas entre si pelas equações 6 e 7, respectivamente, quando X e U são expressos em valores absolutos:

$$H = \frac{X}{1-X} \quad (\text{eq.6})$$

$$X = \frac{H}{1+H} \quad (\text{eq.7})$$

Essas relações podem ser apresentadas em forma de Quadros ou gráficos, conforme ilustra, por exemplo, a Figura 5. Vale ressaltar que o teor de umidade "U" (base seca) é utilizado de maneira muito geral para os materiais e em particular para a madeira e para o papel, seu valor pode ultrapassar 100%. Por outro lado, a umidade "X" (base úmida) é empregada para as pastas celulósicas e, em consequência, também para a madeira destinada à fabricação de pastas celulósicas: ela designa então, por diferença, a proporção em massa de matéria anidra utilizável. Assim, trata-se de um conceito de concentração, utilizado com frequência

no domínio da química e que guarda um sentido lógico quando as taxas de diluição são elevadas. Desta forma, se uma carga de madeira apresenta teor de umidade média na base úmida (X) de 45%, significa que a proporção de madeira absolutamente seca (U%) nessa carga corresponderá a 55%. Da mesma forma, uma suspensão de fibras celulósicas que apresenta teor de umidade na base úmida de 97,5% conterá, assim, 2,5 toneladas absolutamente secas de fibras; é uma questão de proporção.

Tomando-se como base uma carga de 100 toneladas de madeira bruta, é fácil constatar que para qualquer teor de umidade, seja ele expresso na base seca ou na base úmida, a quantidade de madeira absolutamente seca será praticamente a mesma, conforme ilustram as Figuras 6 e 7, respectivamente.

Ressalta-se que o teor de umidade da madeira, quando expresso na base úmida, jamais excede 100%, o que significa que a *massa de água + massa de madeira* absolutamente seca equivalem a 100%, logo, por diferença, pode-se determinar um dos dois componentes. O mesmo raciocínio se aplica no caso de suspensões de polpas celulósicas.

O teor de umidade da madeira exerce influência em praticamente todos os processos de sua conversão e processamento industrial, além

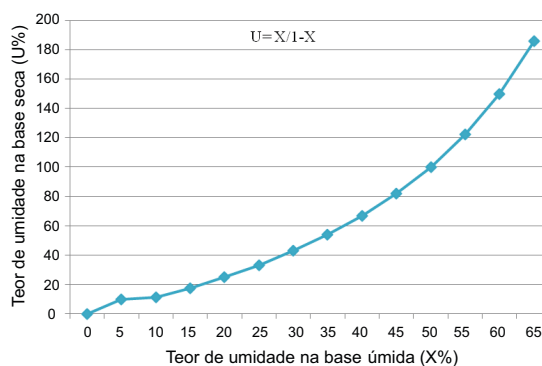


Figura 5 - Correlação entre a umidade na madeira na base seca e na base úmida.

Figure 5 - Correlation between the moisture in the wood on a dry basis and on wet basis.

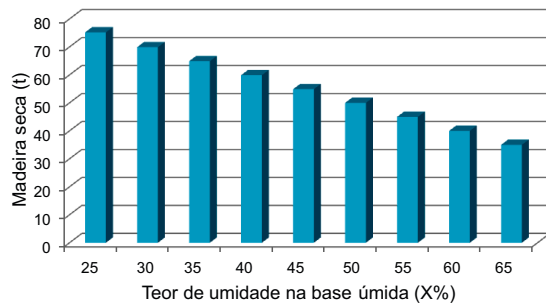


Figura 6 - Quantidade de matéria seca contida numa carga de 100 toneladas de madeira para os diferentes teores de umidade expressos na base úmida (X).

Figure 6 - Amount of dry matter contained in a load of 100 tons of wood for different moisture content expressed in wet basis (X).

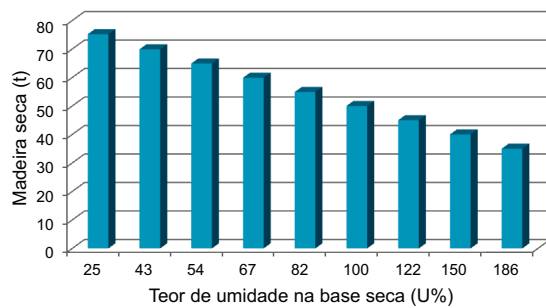


Figura 7 - Quantidade de matéria seca contida numa carga de 100 toneladas de madeira para os diferentes teores de umidade expressos na base seca.

Figure 7 - Amount of dry matter contained in a load of 100 tons of wood for different moisture content expressed in dry basis.

de estar estreitamente relacionada com as suas propriedades físicas e mecânicas. O armazenamento da madeira, seja ele na forma de produtos serrados, cavacos, partículas, etc., desde que em condições de elevada umidade, é responsável por perdas consideráveis dessa matéria-prima.

2.5.1 Influência do conteúdo de umidade no poder calorífico da madeira

O teor de umidade da madeira também exerce influência considerável na sua característica como material combustível, definindo

assim o seu poder calorífico. Este equivale à quantidade de calor liberado pela combustão completa de um corpo, por exemplo, a própria madeira (BEAUDOIN, 1996). Distinguem-se poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico superior (PCS). No caso do primeiro, o vapor de água fornecido pela combustão não é considerado, enquanto para o segundo - PCS - são levadas em consideração as calorias liberadas pela condensação do vapor de água. O PCS equivale a aproximadamente 20 MJ kg^{-1} ($5,5 \text{ kWh kg}^{-1}$) (SUZHOU, 2011). De acordo com Suzhou (2011), o PCI varia segundo a espécie, se conífera ou folhosa, sendo esses valores da ordem de 4,8 a $5,3 \text{ kWh kg}^{-1}$ para as madeiras de folhosas e de $5,1$ a $5,4 \text{ kWh kg}^{-1}$ para as espécies coníferas, conforme ilustra a Figura 8. Todavia, para fins de cálculos pode-se adotar um valor comum de $5,1 \text{ kWh kg}^{-1}$ ou $18,67 \text{ MJ kg}^{-1}$.

Na prática, quando se trata da combustão, não se beneficia das calorias aportadas pela condensação do vapor de água, razão pela qual é de praxe utilizar o PCI como referência para cálculos. O poder calorífico é expresso em unidades internacionais: megajoules por quilograma (Mj kg^{-1}), podendo ser expresso, ainda que com menor frequência, em quilocalorias por quilograma (kcal kg^{-1}). O valor calorífico de 1 kg de madeira absolutamente seca com densidade média, seja ela folhosa ou conífera, equivale a $18,4 \text{ MJ}$, excluindo a matéria mineral, ou seja, $5,1 \text{ kWh kg}^{-1}$ (SUZHOU, 2011). Pode-se calcular o PCI tendo-se como referência a composição química do material combustível, ou seja, os

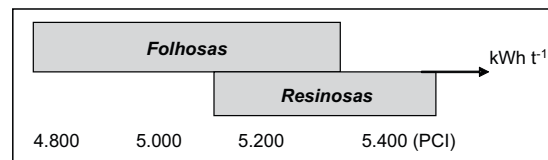


Figura 8 - Poder calorífico inferior (PCI) para espécies folhosas e resinosas (adaptado de SUZHOU, 2011).

Figure 8 - Low calorific value (LCV) for hardwoods and softwoods (adapted from SUZHOU, 2011).

seus respectivos teores de carbono, hidrogênio e oxigênio. Esses elementos químicos interferem igualmente nas diferentes reações que liberam o calor. Essa determinação poderá ser feita por meio da equação 8 (BEAUDOIN, 1996):

$$PCI = 34,03.C + 121,64.H - 12,54.O \left(\frac{Mj}{kg} \right) \quad (\text{eq. 8})$$

O teor de umidade provoca dois efeitos essenciais no poder calorífico. Primeiro, um efeito ponderal: quanto mais úmida a madeira menor será quantidade de matéria seca que ela conterà, o que equivale a dizer que o poder calorífico é reduzido na mesma proporção. Em segundo lugar, uma parte das calorias disponíveis é consumida por evaporação da água, ou seja, cerca de 600 MJ kg⁻¹ de água que se perde nesse processo. Além do conteúdo de umidade, o PCI, para uma espécie vegetal lenhosa ou não, depende de seu teor em matérias minerais (MM). Na prática, para um dado teor de umidade, o efeito acumulado do teor de umidade e da matéria mineral se traduz da seguinte maneira sobre o poder calorífico inferior (PCI), conforme ilustra a equação 9 (BEAUDOIN, 2006):

$$PCI_U = 18,41 \left(\frac{100 - MM}{100 + U} \right) - 2,5 \left(\frac{U}{100 + U} \right) \left(\frac{Mj}{kg} \right) \quad (\text{eq. 9})$$

em que PCI_U = poder calorífico inferior da madeira para um teor de umidade considerado; U = teor de umidade na base seca; e MM = teor de matérias minerais.

Em geral, os materiais lignocelulósicos contêm baixo teor intrínseco em matérias minerais (<1%), opostamente aos resíduos agrícolas ou agroindustriais, alguns dos quais podem atingir cerca de 20% (ex. casca de arroz). Entretanto, o transporte, o armazenamento ou diversas manipulações desses materiais podem agregar matérias minerais exteriores (terra, areia, etc.).

A Figura 9 ilustra a evolução do poder calorífico inferior, segundo o teor de umidade e o conteúdo de matérias minerais, calculado conforme a equação 9.

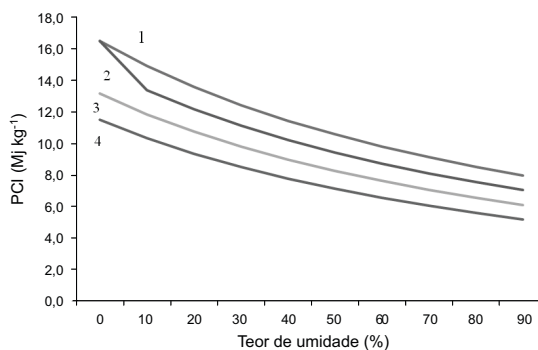


Figura 9 - Evolução do PCI dos materiais lignocelulósicos em função do teor de umidade e de matérias minerais (MM): (1) 0% MM, (2) 10% MM, (3) 20% MM e (4) 30% MM (adaptado de BEAUDOIN, 2006).

Figure 9 - Evolution of the LCV of lignocellulosic materials as a function of moisture content and mineral materials (MM): (1) 0% MM, (2) 10% MM, (3) 20% MM e (4) 30% MM (adapted from BEAUDOIN, 2006).

Combustíveis como a madeira, a turfa e o carvão mineral distinguem-se entre si por uma variação importante de sua composição química, em especial pelo conteúdo em carbono (C). Assim, existe uma correlação direta entre o teor em carbono e o poder calorífico superior, que pode ser expresso pela equação 10 (BEAUDOIN, 1996).

$$PCS = 0,4373.C - 0,3059 \left(\frac{Mj}{kg} \right) \quad (\text{eq. 10})$$

Suzhou (2011), por sua vez, distingue, além do PCI e PCS, o poder calorífico líquido (PCN), que corresponde ao poder calorífico de um determinado material combustível incinerado tal como se apresenta, cuja grandeza depende fortemente da taxa de umidade e este pode ser calculado a partir das equações 11 e 12:

I) considerando 1 kg de massa bruta de combustível madeira para um determinado teor de umidade na base úmida (H_b %):

$$PCN = PCI(1 - H_b/100) - 0,02452H_b \quad (\text{eq. 11})$$

$$= 18,67 - 0,21122H_b \text{ (Mj kg}^{-1} \text{ bruto)}$$

II) considerando 1 kg de massa absolutamente seca (a.s) de combustível a 0% (H_s %):

$$PCN = PCI - 0,02452 H_s \quad (\text{eq. 12})$$

$$= 18,67 - 0,02452 H_s \text{ (Mj kg}^{-1} \text{ a.s)}$$

A Figura 10 ilustra a evolução do poder calorífico líquido (PCN), segundo a variação do teor de umidade da madeira, com base nas equações 11 e 12, respectivamente.

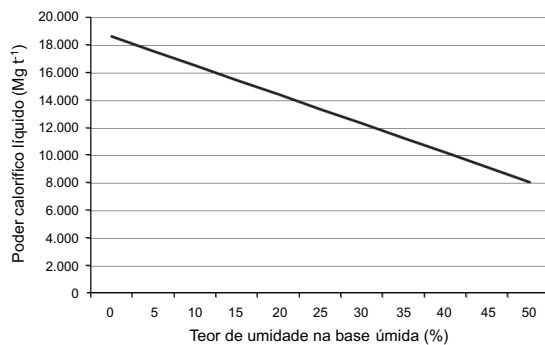


Figura 10 - Evolução do poder calorífico líquido (PCN) segundo os diferentes teores de umidade da madeira (adaptado de SUZHOU, 2011).

Figure 10 - Evolution of the net calorific value (NCP) according to the different levels of moisture content of wood (adapted from SUZHOU, 2011).

3 RETRATIBILIDADE DA MADEIRA

A madeira é um material composto que tem um caráter extremamente heterogêneo, poroso e fortemente higroscópico, cujo comportamento mecânico é ortotrópico e consideravelmente dependente da espécie (leve ou pesada), de sua organização celular (ex. estrutura anômica), da idade do próprio material, de seu teor de umidade e de sua densidade entre outros. Por ser um material altamente higroscópico, a madeira apresenta um comportamento único e diferenciado em relação a

outros materiais estruturais, que é conhecido como retratibilidade. Essa se traduz por variações significativas de suas dimensões e seu volume, quando exposta a condições higrométricas desfavoráveis (RADOMANANTSOA, 2000). A expressão retratibilidade da madeira é utilizada para caracterizar variações dimensionais e volumétricas, sejam elas decorrentes do fenômeno de inchamento ou contração (GOULET, 1980). A manifestação do fenômeno da retratibilidade ocorre entre intervalos precisos de teores de umidade para um determinado corpo-de-prova. Esse se situa entre o PSF e a condição de completa siccidade, ou seja, absolutamente seca (0% de umidade), ou em teores de umidades estabelecidos por Normas Técnicas, por exemplo, 12 e 15%, teores considerados usuais de utilização da madeira (RADOMANANTSOA, 2000). O PSF equivale, praticamente para todas as espécies lenhosas, a um teor de umidade entre 27 e 32%, com algumas exceções (GOULET, 1980; BEAUDOIN, 1996).

A atual Norma Brasileira NBR 7190, da ABNT (1997), adota o teor de umidade de referência de 12%. Desse modo, todo resultado de ensaio deve ser reportado a esse teor de umidade. O antigo método brasileiro MB-26, da ABNT (1940), reeditado como NBR 6230, pela ABNT (1980), utilizava a madeira verde. Assim, os resultados de ensaios do passado não são compatíveis com a atual norma e precisam ser recuperados (LOGSDON et al., 2008).

A retratibilidade linear da madeira segundo a direção anatômica considerada caracterizará, desta forma, a retratibilidade linear tangencial (Tg%) e a retratibilidade longitudinal radial (Rd%), as quais podem ser quantificadas pelos seus respectivos coeficientes de contração máxima ($\beta Tg_{m\acute{a}x}$ e $\beta Rd_{m\acute{a}x}$) e inchamento máximo ($\alpha Tg_{m\acute{a}x}$ e $\alpha Rd_{m\acute{a}x}$), expressos em termos percentuais (GOULET, 1980), conforme mostram as equações 13 a 16: (adaptadas de SALENNAVE, 1955; CECH; PFAFF, 1980; GOULET, 1980; ROWELL; BANKS 1985; BEAUDOIN, 1996):

I) Coeficiente máximo de retratibilidade linear tangencial

$$\beta L_{Tg} = \frac{\text{Dimensão tangencial (> PSF)} - \text{Dimensão tangencial (0\%)}}{\text{Dimensão tangencial (> PSF)}} \times 100 \quad (\text{eq. 13})$$

II) Coeficiente máximo de retratibilidade linear radial (%)

$$\beta L_{Rd} = \frac{\text{Dimensão radial (> PSF)} - \text{Dimensão radial (0\%)}}{\text{Dimensão radial (> PSF)}} \times 100 \quad (\text{eq. 14})$$

III) Coeficiente máximo de inchamento linear tangencial (%)

$$\alpha L_{Tg} = \frac{\text{Dimensão tangencial (> PSF)} - \text{Dimensão tangencial (0\%)}}{\text{Dimensão tangencial (0\%)}} \times 100 \quad (\text{eq. 15})$$

IV) Coeficiente máximo de inchamento radial (%)

$$\alpha LRd = \frac{\text{Dimensão radial (> PSF)} - \text{Dimensão radial (0\%)}}{\text{Dimensão radial (0\%)}} \times 100 \quad (\text{eq. 16})$$

O conhecimento da retratibilidade tangencial e radial das espécies lenhosas é uma ferramenta eficaz para se conhecer previamente o comportamento da madeira, por exemplo, quando submetida à secagem (deformações) e estabilidade dimensional de produtos acabados entre outros. Essas duas grandezas dão conta da diminuição relativa das direções tangencial e radial associadas às dimensões do material (madeira) entre o estado saturado de água e aquele completamente seco (RADOMANANTSOA, 2000).

A relação entre a retratibilidade longitudinal tangencial e a retratibilidade longitudinal radial, conforme ilustra a equação 17, define o fator de anisotropia dimensional (A). Quanto mais próxima do valor unitário, esta relação indicará que uma determinada espécie será mais apropriada para determinados fins, como movelaria, finalidades estruturais e comportamento mais estável quando submetida à secagem industrial (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968; SALENAVE, 1955; GONÇALEZ et al., 2006). De acordo com Silva e Oliveira (2003), a diferença entre a retratibilidade tangencial e a radial pode ser explicada pela influência restritiva dos raios na direção radial e também pelo

arranjo helicoidal diferente das microfibrilas nas paredes tangenciais e radiais.

$$A = \frac{\beta LTg (\%) }{\beta LRd (\%) } \times 100 \quad (\text{eq. 17})$$

A retratibilidade volumétrica, de acordo com Alteyrac (2005), é uma das características físicas mais importantes da madeira, principalmente quando se trata do processo de secagem. A anisotropia reflete as variações dimensionais e volumétricas da madeira, decorrentes da desorção e, ou, adsorção de umidade, e, em consequência, ela conduz a retratibilidades diferenciadas, quer seja no sentido longitudinal, onde ela é praticamente desprezível em termos práticos, quanto nos sentidos longitudinal tangencial e longitudinal radial. A retratibilidade longitudinal (*Tg* ou *Rd*) apresenta variações entre a madeira juvenil e aquela considerada adulta, as quais são a origem de deformações significativas da madeira. A retratibilidade (ex. contração) consiste na diminuição das dimensões da madeira e tem sua origem na própria estrutura das células lenhosas. A retratibilidade volumétrica, que agrupa os três tipos de

retratibilidade, está ligada à espessura das paredes celulares, enquanto a retratibilidade longitudinal depende essencialmente do ângulo das microfibrilas (ALTEYRAC, 2005). A retratibilidade volumétrica total da madeira pode ser quantificada em termos percentuais, a partir da equação 18 (CECH; PFAFF, 1980):

$$Rv(\%) = \frac{\text{Volume da amostra saturada } (> PSF) - \text{Volume } (0\%)}{\text{Volume da amostra saturada } (> PSF)} \times 100 \quad (\text{eq. 18})$$

Para bem caracterizar a retratibilidade de uma madeira qualquer é necessário conhecer o seu comportamento sob a influência das variações de umidade que ocorrem normalmente naquelas faixas de umidade consideradas normais para sua utilização prática. Nesse caso, procede a determinação da variação volumétrica da madeira em termos percentuais, quando o seu teor de umidade varia de 1%. O resultado é o que se denomina coeficiente de retratibilidade volumétrica (Crv), que é expresso pela equação 19 (CECH; PFAFF, 1980):

$$Crv(\%) = \frac{Rv}{PSF} \times 100 \quad (\text{eq. 19})$$

em que Rv = retratibilidade volumétrica total (%); e PSF = umidade equivalente ao ponto de saturação das fibras.

O coeficiente de retratibilidade é utilizado para fornecer indicações sobre o comportamento da madeira exposta à influência de variações sazonais de diferentes condições higrométricas do ar atmosférico, podendo, desta forma, evidenciar sua retratibilidade decorrente de seu caráter anisotrópico, que, em termos práticos, é referido como sendo “nervosidade”. Assim, quanto menor o Crv mais estável será a madeira e vice-versa. Com base na intensidade do Crv , as madeiras podem ser classificadas em madeiras extremamente nervosa, quando o Crv é $> 0,75$; madeiras nervosas, quando o Crv está entre 0,55 e 0,75; madeira nervosa, se o Crv varia entre 0,35 e 0,55; e finalmente madeira pouco nervosa, se o Crv está entre 0,15 e 0,35 (JOLY; MORE-CHEVALIER, 1980).

Com base nessa classificação proposta por Joly e More-Chevalier (1980), o Quadro 1 ilustra o comportamento de algumas espécies nativas brasileiras em relação às variações sazonais de condições higrométricas do ar atmosférico.

Segundo Rowell e Banks (1985), a celulose e as polioses são mais higroscópicas do que a lignina e, por isto, as maiores responsáveis pela retratibilidade da madeira. Browning (1963) relatou que no caso da madeira de *Eucalyptus regnans* a contribuição da celulose no processo de adsorção da umidade total nas paredes celulares foi da ordem de 47%, o das polioses de 37% e o da lignina de apenas 16%. Decorrente da adsorção de água pelas paredes celulares, o volume da madeira, por sua vez, aumenta quase que proporcionalmente ao volume de água adicionado. Esse processo de inchamento ocorrerá até no PSF, quando as membranas celulares estão completamente saturadas. É a condição em que se registra o maior percentual de inchamento (ROWELL; BANKS, 1985).

De acordo com Stamm (1964), citado por Rowell e Banks (1985), a porcentagem de inchamento volumétrico da madeira ocorre por causa do coeficiente de expansão higroscópica, que é dependente da massa volúmica ou densidade da madeira. A porcentagem de inchamento volumétrico é então uma função da densidade considerada nas condições de seca ao ar e do teor de umidade do ponto de saturação das fibras considerado, podendo ser estimada a partir da equação 20:

$$V = Kf.d \quad (\text{eq. 20})$$

Quadro 1 - Comportamento de algumas espécies nativas brasileiras em relação às suas características anisotrópicas

Table 1 - Behavior of some Brazilian native species in relation to its anisotropic characteristics

Espécie	Nome Comum	Retratibilidade Volumétrica total (%)	Coefficiente de Retratibilidade Volumétrica	Característica da Madeira
<i>Vatairea heteroptera</i> Ducke	Angelim	21,3	0,83	Extremamente nervosa
<i>Mirocarpus</i> sp.	Óleo-pardo	18,7	0,76	Extremamente nervosa
<i>Eschweilera branchetiana</i> (Berg.) Miers	Imbiriba	23,2	0,82	Extremamente nervosa
<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	Angelim-vermelho	14,6	0,64	Nervosa
<i>Lueha divaricata</i> Mart.	Açoita-cavalo	12,4	0,46	Nervosa
<i>Amburana cearensis</i> Fr. Allem.	Amburana ou Cerejeira	9,3	0,45	Nervosa
<i>Carapa guianensis</i> Aubl.	Andiroba	13,4	0,50	Nervosa
<i>Astronium urundeuva</i> (Fr. Allem.) Engl.	Aroeira-do-sertão ou urundeúva	12,6	0,54	Nervosa
<i>Melanoxylon brauna</i> Schott	Braúna-preta	10,5	0,50	Nervosa
<i>Cedrela</i> sp	Cedro	11,6	0,40	Nervosa
<i>Swietenia macrophylla</i> King	Mogno ou aguano	8,6	0,39	Nervosa
<i>Dipterix alata</i> Vog.	Cumbaru ou baru	12,5	0,61	Nervosa
<i>Hura creptans</i> L.	Açacu	8,6	0,32	Pouco nervosa
<i>Tabebuia cassinoides</i> (Lam.) P.DC.	Caixeta	10,0	0,34	Pouco nervosa

Fonte: Mainieri e Chimelo (1989).

em que V = porcentagem de inchamento volumétrico; e K_f = umidade no ponto de saturação das fibras (PSF)

$PSF < 25\%$: PSF fraco

$25 < PSF < 35\%$: PSF médio

$PSF > 35\%$: PSF elevado

A equação 20 determina o inchamento volumétrico aproximado, passando da condição absolutamente seca (0%) para a condição do PSF , e a contração volumétrica da madeira, passando do PSF para a condição de absolutamente seca. Desvios nessa relação são normalmente encontrados em espécies lenhosas que apresentam teores de extrativos significativamente elevados. Como a madeira é um material anisotrópico, ela incha e se contrai de forma diferente nas três direções anatômicas: 1) longitudinal (direção vertical), 2)

tangencial (paralela às camadas ou anéis anuais de crescimento) e 3) radial (perpendicular aos respectivos anéis de crescimento). As alterações dimensionais no sentido longitudinal são geralmente muito pequenas. O máximo inchamento e a máxima contração tangencial variam entre 2 e 15%, dependendo da densidade da madeira. Variações dessas grandezas no sentido radial são, em geral, pequenas, em torno de 40 a 70% do inchamento tangencial (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1974).

De acordo com Cech e Pfaff (1980), as variações volumétricas da madeira abaixo do PSF são diretamente proporcionais ao volume de água ganho ou perdido pelas paredes celulares, e essa relação pode ser expressa pela equação 21:

$$R_v = D (f/TU) \quad (\text{eq.21})$$

em que R_v = retratibilidade volumétrica total expressa em porcentagem do volume da madeira verde; D = densidade básica (g cm^{-3}); f = ponto de saturação das fibras (porcentagem em TU); e TU = teor de umidade abaixo do PSF .

Dentro desse contexto, uma espécie lenhosa cuja densidade básica é igual a $0,35 \text{ g cm}^{-3}$ e que deverá ser submetida à secagem até o teor de umidade final de 19% apresentará retratibilidade volumétrica total de 3,8%, considerando o PSF igual a 30%.

Admitindo-se um PSF igual a 30%, cada valor unitário de porcentagem em teor de umidade diminuindo abaixo de 30% representará retratibilidade de 1/30 da retratibilidade volumétrica total. Mas essa fórmula não é aproximativa, e os valores de retratibilidade normalmente determinados para uma espécie considerada se fazem a partir de uma série de corpos-de-prova. À medida que a madeira seca, a retratibilidade ocorre, até que o teor de umidade de equilíbrio seja atingido. No cálculo das margens de retratibilidade, é essencial conhecer o teor de umidade final da madeira após a secagem. A retratibilidade da madeira utilizada, por exemplo, na construção em torno de 15% é evidentemente inferior àquela da mesma madeira, para fins de movelaria, uma vez que o teor de umidade final é da ordem de 8%. Uma mesma espécie está sujeita a importantes variações de retratibilidade, o que torna impossível a predição exata da retratibilidade para uma determinada peça. A retratibilidade média de um grande número de peças é, por outro lado, previsível, e poderá ser estimada a partir da madeira verde, não importa qual seja o teor de umidade, fazendo uso da equação 22 (CECH; PFAFF, 1980):

$$R_m = R_o \frac{(30 - U)}{(30)} \quad (\text{eq. 22})$$

em que R_m = porcentagem de retratibilidade prevista a partir da madeira verde; R_o = retratibilidade volumétrica total, tangencial ou

radial, expressa em porcentagem (valores disponíveis para as diferentes espécies); e U = teor de umidade final para uma determinada espécie (< PSF).

Com base na equação 22, a porcentagem de retratibilidade volumétrica para o mogno e a caixeta submetidos à secagem convencional até um teor de umidade final de 13% será da ordem de 4,6 e 11,36%, respectivamente, considerando o PSF igual a 30% e as suas respectivas retratibilidades volumétricas totais iguais a 8,6 e 21,3%.

O inchamento da madeira em contato com a umidade exerce uma força de compressão excessivamente elevada, e esse valor foi teoricamente determinado por Stamm (1964), citado por Rowell e Banks (1985), como sendo equivalente a 1.630 atmosferas ou 24.000 libras pol^{-2} . Tarkow e Turner (1968), citados por Rowell e Banks (1985), encontraram para a madeira de *yellow birch* (*Betula alleghaniensis*) um esforço de compressão devido ao inchamento da ordem de 50% daquele citado por Stamm (1964). No entanto, quando a madeira em uso sofre inchamento as forças desenvolvidas poderão causar sérios danos. Os antigos egípcios utilizavam a força decorrente do inchamento da madeira para quebrar grandes rochas em diferentes tamanhos. O processo consistia, primeiramente, em promover uma sequência de furos nessas rochas e, em seguida, estacas secas eram introduzidas no interior de cada um desses furos e enxarcadas com água. Com o inchamento inevitável dessas estacas, a rocha era prontamente seccionada em diferentes dimensões (ROWELL; BANKS, 1985).

4 DENSIDADE OU MASSA VOLÚMICA

Segundo Goulet (1980), a densidade, a massa específica e a massa volúmica são grandezas teoricamente diferentes, mas que na prática apresentam determinação idêntica. No sistema métrico a massa específica é expressa pelo mesmo número que a densidade ou a massa volúmica em relação à água.

Frequentemente essas noções são confundidas. Sabe-se, no entanto, que a densidade é uma grandeza que é expressa sem unidade, considerando que a relação massa específica de um determinado corpo e massa específica da água é o que ser pode denominado de “densidade relativa”. Sendo o valor da massa específica da água igual a 1 g cm^{-3} , então sua densidade relativa será expressa pelo mesmo número. Geralmente a densidade é definida como sendo a relação entre a massa de um corpo-de-prova e o seu volume, e essa relação é expressa em kg m^{-3} , ou mais correntemente em g cm^{-3} . No caso da madeira, considerando sua porosidade, sua heterogeneidade em função não somente das diferentes espécies, mas também em função da variabilidade entre os próprios indivíduos, além de sua higroscopicidade, torna-se difícil obter uma massa específica do material madeira. Por essa razão é que existem diferentes formas de expressar a densidade.

Por sua vez, Beaudoin (1996) define a densidade de um corpo como sendo a relação de sua massa e a massa de um mesmo volume de água. O número que a expressa é aquele de sua massa volúmica expressa em g cm^{-3} . No caso de um material heterogêneo e higroscópico que nem a madeira, sua massa volúmica, e consequentemente sua densidade, é função não somente da dimensão das células que a compõem e da espessura de suas paredes, mas também do teor de umidade do material que influencia tanto a massa quanto o volume. Isto significa dizer que para estimar a massa volúmica ou a densidade que sejam efetivamente passíveis de comparações e replicáveis, o teor de umidade da madeira no momento dessas determinações deverá ser controlado e padronizado. Assim, segundo os utilizadores e as utilizações, três expressões de densidade são geralmente consideradas, conforme ilustram as equações 23, 24 e 25 (BEAUDOIN, 1996):

$$Densidade\ básica\ (Db) = \frac{Massa\ volúmica\ basal\ \left(\frac{Mo}{Vs}\right)}{Massa\ volúmica\ da\ água\ \left(1,0\ \frac{g}{cm^3}\right)} \quad (eq.23)$$

$$Densidade\ anidra\ (Do) = \frac{Massa\ volúmica\ anidra\ \left(\frac{Mo}{Vo}\right)}{Massa\ volúmica\ da\ água\ \left(1,0\ \frac{g}{cm^3}\right)} \quad (eq.24)$$

$$Densidade\ úmida\ (Du) = \frac{Massa\ volúmica\ úmida\ \left(\frac{Mo}{Vu}\right)}{Massa\ volúmica\ da\ água\ \left(1,0\ \frac{g}{cm^3}\right)} \quad (eq.25)$$

No mais, pode-se estabelecer uma relação entre a massa volúmica básica e a massa volúmica úmida, e essa relação é expressa pela seguinte 26:

$$Du = \frac{Db}{1 - \left(\frac{\beta vu}{100}\right)} \quad (eq. 26)$$

em que β_{vu} corresponde ao coeficiente de retratibilidade volumétrica para o teor de umidade “ $U\%$ ”.

A densidade básica (Db) é mais correntemente mencionada e utilizada. Sua principal vantagem vem do fato de que a massa anidra ou absolutamente seca e o volume verde ou saturado são condições constantes e facilmente reproduzidas para um material como a madeira. A densidade anidra (Do), por sua vez, é principalmente utilizada em trabalhos de pesquisas: o estado anidro ou completamente seco é mais fácil de obter e de conservar em laboratório. A densidade a um teor de umidade qualquer ($U\%$) é empregada principalmente nos trabalhos de engenharia. Ela é avaliada a 12% (U), o que corresponde ao teor de umidade de utilização mais corrente. Ressalta-se que as três fórmulas de determinação da massa volúmica utilizam unicamente a massa anidra no numerador. Na Europa, entretanto, para a densidade úmida (Du), a massa é às vezes calculada no mesmo teor de umidade (U) que o volume (BEAUDOIN, 1996).

Os valores obtidos mediante a aplicação das equações 23, 24 e 25 são frequentemente qualificados de densidades aparentes, uma vez que o volume inclui não somente a matéria lenhosa contida na madeira, mas também as cavidades, a água, os extrativos, etc. Assim, essas estimativas são muito inferiores à densidade real da substância lenhosa propriamente dita, que se situa em torno de $1,5 \text{ g cm}^{-3}$, independentemente da espécie considerada. A densidade aparente é também muito mais irregular. Ela varia não somente de uma espécie a outra, mas também no interior de uma mesma árvore. A estrutura interna da madeira, a posição segundo o eixo vertical da árvore, a distância a partir do centro do tronco, assim que a proporção de lenho inicial e lenho tardio são os principais fatores que afetam a densidade de uma peça de madeira. Portanto, a aferição da densidade de uma espécie qualquer deverá se basear em um grande número de medidas, para que possa ter validade e permitir inferên-

cias. Ressalta-se que um coeficiente de variação da ordem de 10% por ser atribuído à variabilidade das espécies (BEAUDOIN, 1996).

A determinação da massa de um corpo-de-prova é feita mediante o uso de uma balança de precisão. O volume, por sua vez, pode ser obtido de diferentes maneiras. O método mais simples consiste em medir manualmente o corpo-de-prova, por exemplo, com um paquímetro, e em seguida calcula-se seu volume quando se tratar de corpos-de-prova com formas regulares. Em situação contrária, os métodos por imersão em água ou em mercúrio parecem ser os mais apropriados, mesmo que comportem certos inconvenientes. No caso da imersão em água, o principal inconveniente relacionado aos corpos-de-prova secos é que quando da imersão eles poderão absorver certa quantidade de água, prejudicando assim a precisão dessa determinação. A principal desvantagem do volumenômetro que utiliza mercúrio (volumenômetro de Breuil) é que ele é restrito a corpos-de-prova de pequenas dimensões. Existem outros métodos de avaliar diretamente a densidade da madeira, por exemplo, por radiações aos raios-x, beta e gama. Esses métodos são muito rápidos, relativamente precisos e, sobretudo, não destrutivos. Um conhecimento exato do teor de umidade no ponto de determinação é, todavia, necessário (GOULET, 1980).

Ressalta-se que a determinação da massa volúmica da madeira ou sua densidade depende muito do efeito de escala, o que conduz a uma grande variabilidade em sua determinação. No caso de uma tora, a massa volúmica estimada é uma média que inclui aquela da madeira juvenil, da madeira considerada madura ou adulta e dos nós. Em uma escala menor, como no caso de corpos-de-prova, o valor estimado é uma média da massa volúmica de várias camadas anuais de crescimento. No caso de uma camada anual de crescimento, a massa volúmica corresponderá à média de massas do lenho inicial e tardio. Finalmente, a massa volúmica da matéria lignocelulósica, ou seja, dos

constituintes fundamentais da parede celular, é constante e equivale a aproximadamente $1,50 \text{ g cm}^{-3}$ (ALTEYRAC, 2005). O Quadro 2 mostra a classificação das espécies lenhosas segundo a sua massa volúmica, e no Quadro 3 estão algumas espécies lenhosas nativas e exóticas com as suas respectivas massas volúmicas. Ressalta-se que o Laboratório de Produtos Florestais (IBDF/DPq-LPF 1988) classifica as madeiras folhosas nativas brasileiras em três categorias, segundo as suas respectivas densidades básicas: leves ($<0,50 \text{ g cm}^{-3}$), médias ($0,50 \text{ a } 0,72 \text{ g cm}^{-3}$) e pesadas ($>0,72 \text{ g cm}^{-3}$).

Quadro 2 - Classificação das espécies lenhosas segundo as suas massas volúmicas

Table 2 - Classification of woody species according to their densities

Massa volúmica (g cm^{-3}) ⁽¹⁾	Coníferas	Folhosas
Muito leve	< 0,40	<0,50
Leve	0,40 a 0,49	0,50 a 0,64
Medianamente pesada	0,50 a 0,59	0,65 a 0,79
Pesada	0,60 a 0,70	0,80 a 0,95
Muito pesada	>0,70	> 0,95

⁽¹⁾ Massa volúmica calculada a 12% de umidade.

Fonte: Salenave (1955).

Quadro 3 - Espécies lenhosas nativas e exóticas com as suas respectivas massas volúmicas

Table 3 - Native and exotic woody species with their respective densities

Espécie	Nome Comum	Massa Volúmica (g cm^{-3}) ⁽¹⁾
<i>Vatairea heteroptera</i> Ducke	Angelim	0,93
<i>Mirocarpus</i> sp.	Óleo-pardo	0,76
<i>Eschweilera branchetiana</i> (Berg.) Miers	Imbiriba	1,13
<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	Angelim-vermelho	1,09
<i>Lueha divaricata</i> Mart.	Açoita-cavalo	0,64
<i>Amburana cearensis</i> Fr. Allem.	Amburana ou Cerejeira	0,60
<i>Carapa guianensis</i> Aubl.	Andiroba	0,72
<i>Astronium urundeuva</i> (Fr.Allem.) Engl.	Aroeira-do-sertão ou urundeúva	1,19
<i>Melanoxylon brauna</i> Schott	Braúna-preta	1,05
<i>Cedrela</i> sp.	Cedro	0,53
<i>Suietenia macrophylla</i> King	Mogno ou aguano	0,63
<i>Dipterix alata</i> Vog.	Cumbaru ou baru	1,10
<i>Dipterix odorata</i> (Aubl.) Willd.	Cumaru	1,09
<i>Hura creptans</i> L.	Açacu	0,40
<i>Tabebuia cassinoides</i> (Lam.) P.DC.	Caixeta	0,48
<i>Aspidosperma plyneuron</i> Muell. Arg.	Peroba-rosa	0,79
<i>Araucaria angustifolia</i> (Bert.) O. Kuntze.	Pinho-do-paraná	0,55
<i>Caryocar villosum</i> (Aubl.) Pers.	Piquiá	
⁽¹⁾ Massa volúmica calculada a 15% de umidade. Fonte: Mainieri e Chimel o (1989).		
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Douglas	0,487 ⁽²⁾
<i>Betula papyrifera</i>	Bouleau a papier	0,571
<i>Quercus rubra</i>	Chêne rouge	0,612
<i>Acer sacharum</i>	Érable a sucre	0,659
<i>Populus tremuloides</i>	Faux-tremble	0,408
<i>Pinus strobus</i>	Pin blanc	0,368
<i>Pinus resinosa</i>	Pin rouge	0,401
<i>Thuja occidentalis</i>	Thuja occidental	0,302
⁽¹⁾ Massa volúmica calculada a 12% de umidade. Fonte: Beaudoin (1996).		

5 CONCLUSÕES

Este documento teve como objetivo fazer uma abordagem sobre as principais propriedades físicas da madeira. Ressalta-se, no entanto, que em qualquer consideração técnicas sobre a madeira é imprescindível ter em mente a sua origem vegetal. Esta lhe confere, entre outros, uma estrutura complexa e variabilidade elevada, o que faz da madeira um material formidável pelos desafios que ela representa para qualquer uma de suas inúmeras utilizações. Embora a discussão apresentada neste documento tenha sido sucinta, ela permite ainda assim, ressaltar algumas reflexões relativas à madeira. Entre essas, a importância que as propriedades físicas aqui abordadas têm para inúmeras utilizações da madeira. Na secagem, por exemplo, a qualidade do produto final depende estreitamente do modo como o processo foi conduzido em termos de remoção da umidade. No setor do mobiliário e seus componentes, como também para fins estruturais, a secagem se associa igualmente à retratibilidade da madeira. O conhecimento e o controle de ambas irão refletir diretamente na qualidade dos produtos acabados, assim como na sua estabilidade. O potencial da biomassa florestal para fins energéticos, por sua vez, é tão mais evidente quanto maior é a possibilidade de utilização de materiais mais densificados, quer sejam naturais (espécies de maiores densidade) ou artificiais (biomassa densificada), associados a conteúdos de umidade mais baixos. É praticamente impossível dissociar qualquer uma dessas características da madeira quando o objetivo é sua utilização de forma mais racional, quer seja industrial ou não. Ainda que pesem sobre a madeira algumas desvantagens, ela apresenta muitos atributos que consagraram inúmeras de suas utilizações. Por ser um recurso natural renovável, a madeira permanecerá sempre como competidora com outros materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTEYRAC, J. **Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'épinette noire (*Picea mariana* (mill.)(b.s.p.))**. 2005. 150 f. Thèse (Doctorat) – Université Laval, Québec, 2005.
- BEAUDOIN, M. Propriétés physico-mécaniques du bois. (In): FORESTIERIE, M. **Ordre des ingénieurs forestiers du Québec**. Québec: Les Presses de L'Université Laval. 1996. p. 1301-1311.
- BENABDALLAH, B. Structure de la matière ligneuse. (In): FORESTIERIE, M. **Ordre des ingénieurs forestiers du Québec**. Québec: Les Presses de L'Université Laval. 1996. p. 1226-1295.
- CECH, M. Y. F. PFAFF. **Manuel de l'opérateur de séchoir à bois pour l'Est du Canada**. Forintek Canada Corp. Laboratoire des Produits Forestiers de l'Est. SP504FR. 1980. 209 p.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. Wood handbook: Wood as engineering material. Agric. Handb. 72. Washington, DC: U. S. Department of Agriculture, Forest Service; ver. 1974.
- GONÇALEZ, J. C. et al. Características tecnológicas da madeira de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 3, p. 329-341, 2006.
- GOULET, M. **Notes des cours de physique du bois**. Québec: Département des Sciences du Bois et de La Forêt, Université Laval, 1980. 139 p.
- HUSSON, J-M. **Loi de comportement viscoélastique avec effet**: application a la mecanosorption dans le bois. 2009. 134 f. Thèse (Doctorat) – Université de Limoges, Limoges. 2009. 134 p.
- IBDF/DPq-LPF. **Madeiras da Amazônia, características e utilização**: Estação Experimental de Curuá-Una. Brasília-DF, 1988. 236 p.

- JOLY, P.; MORE-CHEVALIER, F. **Théorie, pratique et économie du séchage du bois**. Dourdan, France: Editions H. Vial. 1980. 203 p.
- KOLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of wood science and thecnology**. Berlin: Springer Verlag. 1968. 592 p.
- LAMINE, H. M. **Effet de l'humidité sur les caractéristiques thermiques et mecaniques de materiaux utilisés dans la construction**. Memoire de fin d'études. Algérie: Universite Mentouri de Constantine, Faculté des Sciences Exactes, Département de Physique. 2010. 92 p.
- LOGSDON, B. N.; FINGER, Z.; BORGES, C. G. A. Caracterização físico-mecânica da madeira de peroba-mica, *Aspidosperma populifolium* A. DC. (Apocynaceae). **Floresta**, v. 38, n. 1, p. 1-21, 2008.
- MAINIERI, C.; CHIMELO, J. P. **Fichas de características das madeiras brasileiras**. 2.ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Divisão de Madeiras. 418 p. 1989. (Publicação IPT, n. 1791).
- MEITE, M. A. et al. Etude de l'influence des propriétés physiques sur le comportement mécanique des bois de pin maritime et de pin d'alep-en vue de l'application à l'énergie éolienne. **Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda**. p. 61-65, 2007.
- RADOMANANTSOA, F. G. **Contribution a l'etude des impacts de la sylviculture sur la qualité du bois de *Pinus elliottii* Engelm. dans le perimetre de reboisement de la Fanalamanga**. Memoire de fin d'études d'Ingeniorat. Madagascar: Université D' Antananarivo. Département des Eaux et Forêts. 2000. 77 p.
- ROWELL, R. M.; BANKS, W. B. Water repellency and dimensional stability of wood. **Forest Products Laboratory**. p. 1-21. 1985. (General Technical Report, FPL-50)
- SALENNAVE, P. Propriétés physiques et mecaniques de bois tropicaux de l'Union française. Centre technique Forestier Tropical, Nogent-sur-Marne. 1er supplément (1964) et 2e supplément (1971). 1955.
- SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S. Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm., em diferentes condições de umidade relativa do ar. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 233-239, 2003.
- TARKOW, H.; TURNER, H. D. The swelling pressure of wood. **Forest Products Journal**, v. 8, n. 7, p. 193-197, 1958.
- STAMM, A. J. **Wood and cellulose science**. New York: Ronald Press Co.; 1964. 549 p.
- SUZHOU, Y. Caractérisation et conditionnement de la biomasse forestière résiduelle pour le chauffage collectif. Apresentação em Power-Point. Disponível em: <www.serex.qc.ca>. Acesso em: 25 out. 2011.