

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A madeira é um material lenhoso, formado por células dispostas nos sentidos radial e axial, ligadas entre si pela lignina, que age como um cimento, conferindo sustentação ao tronco. Estas células passaram por vários estágios de desenvolvimento, como a divisão celular, diferenciação e maturação, sendo influenciadas em cada um desses estágios por fatores genéticos, edáficos, climáticos, silviculturais, geográficos, dentre outros, apresentando variações dimensionais e químicas, resultando em material não uniforme, com alta variabilidade, entre e dentro da árvore (ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989). Se por um lado, esta variabilidade torna a madeira um material que pode ser empregado para diferentes tipos de produtos, por outro, torna um grande inconveniente na sua utilização como matéria-prima para produtos específicos, necessitando de um conhecimento prévio de suas propriedades e variações. Seu uso depende da qualidade que pode ser determinada em função dos requisitos exigidos pelo produto final. Vários autores referem-se às propriedades anatômicas, químicas, físicas e morfológicas, como sendo as principais variáveis de qualidade da madeira (LARSON, 1969; BARRICHELO, 1979; ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989; MOURA, 2000) e às propriedades mecânicas, quando se considera a madeira para fins estruturais (MATOS, 1997).

### 2.1 PROPRIEDADES ANATÔMICAS

#### 2.1.1 Dimensões das Fibras

As madeiras de coníferas apresentam uma estrutura relativamente simples, constituída por dois tipos de células, as de raio que correspondem de 5 % a 10 % da madeira e as fibras axiais que correspondem de 90 % a 95 % da madeira. As fibras axiais são células longas e delgadas, sendo as mais importantes em termos de utilização da madeira.

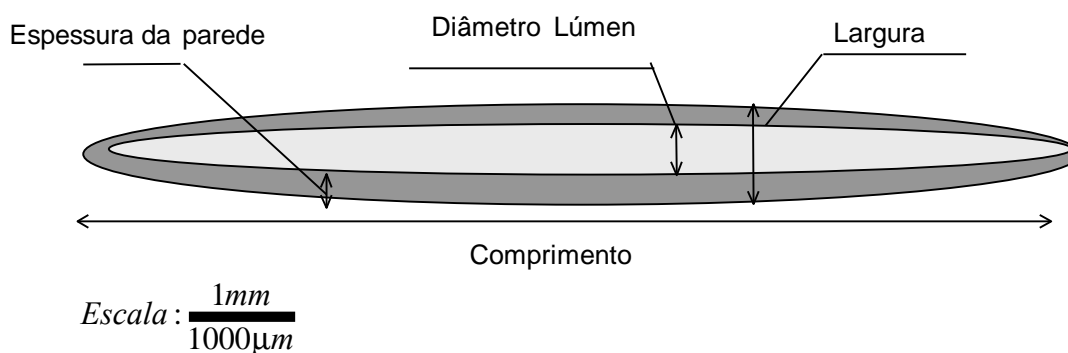
É importante enfatizar que o termo fibras é, tecnicamente, utilizado para espécies de folhosas, sendo denominado de traqueídeos ou traqueóides para coníferas. Entretanto, por ser mais fácil, adota-se o termo fibras em ambas as

situações, principalmente nas indústrias de produtos de base florestal (MEGRAW, 1985). Na presente pesquisa, o termo fibras será utilizado para se referir aos traqueóides de *Pinus taeda* e de outras espécies de coníferas.

As dimensões das fibras são indicadores importantes do potencial de uma madeira para a fabricação de papel. Estas exercem influência direta nas variáveis de processo, principalmente no grau de refino, na qualidade da pasta e, conseqüentemente, nas resistências físicas e mecânicas do papel (FOELKEL, 1976; BARRICHELO, 1979; SHIMOYAMA, 1990; KLOCK, 2000; HASSEGAWA, 2003).

Os parâmetros, usualmente considerados nos estudos de fibras, compreendem quatro medidas fundamentais: comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume, esquematizados na Figura 1.

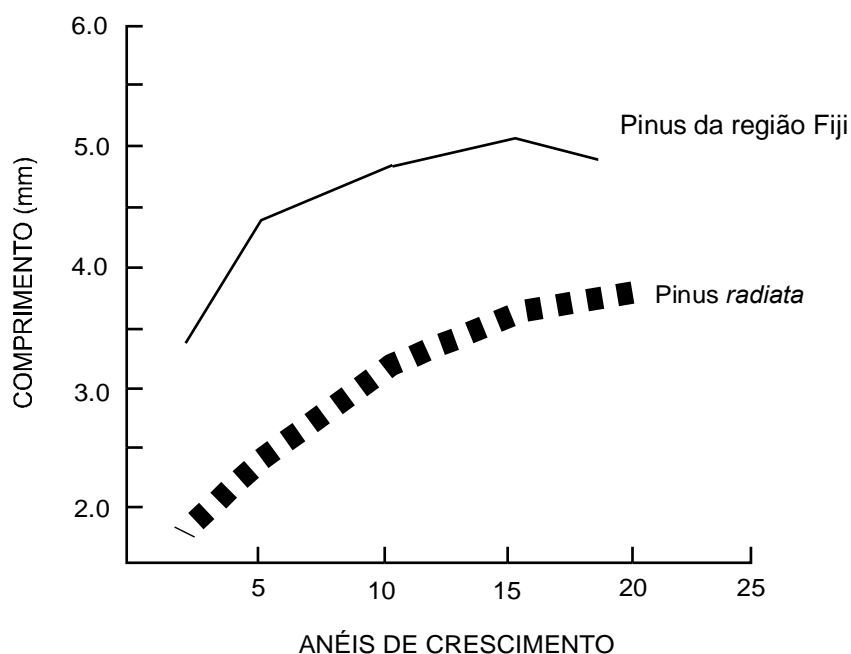
FIGURA 1 - ESQUEMA DE UMA FIBRA



As dimensões das fibras são controladas por diferentes processos fisiológicos, variando dentro da árvore nos sentidos radial e axial, que segundo BARRICHELO (1979) são as variações mais significativas. O comprimento das fibras é diretamente influenciado pelas divisões longitudinais-tangenciais que ocorrem no câmbio. Estas, por sua vez, são controladas pela taxa de hormônios da árvore a qual está ligada à sazonalidade, às condições ambientais e à fatores genéticos, dentre outros. Quando as condições são propícias para um maior crescimento, a taxa de hormônios aumenta, induzindo as células cambiais às rápidas divisões. Assim, não há tempo suficiente para o incremento em comprimento da fibra antes da próxima divisão, sendo observadas fibras mais curtas em períodos de alto ritmo de crescimento (PANSIN; DE ZEEUW, 1980; SHIMOYAMA, 1990). Esta propriedade

também é influenciada pela idade da árvore. Com o aumento da idade, as células cambiais passam a produzir células com maiores dimensões até atingirem a estabilização em idades mais avançadas (COWN, 1975; COWN, 1980; TOMAZELLO FILHO, 1985). Dessa forma, há um aumento do comprimento de fibras no sentido medula-casca (COWN, 1975, COWN, 1992; BARRICHELO, 1979; KIBBLEWHITE; LLOYD, 1983; CORSON, 1984; CORSON, 1991; MUNIZ, 1993; KLOCK, 2000), com fibras mais curtas na região interna do tronco (madeira juvenil). Esta variação é ilustrada na Figura 2 para *P. radiata*.

FIGURA 2 - VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE FIBRAS NO SENTIDO RADIAL PARA ÁRVORES DE *Pinus*

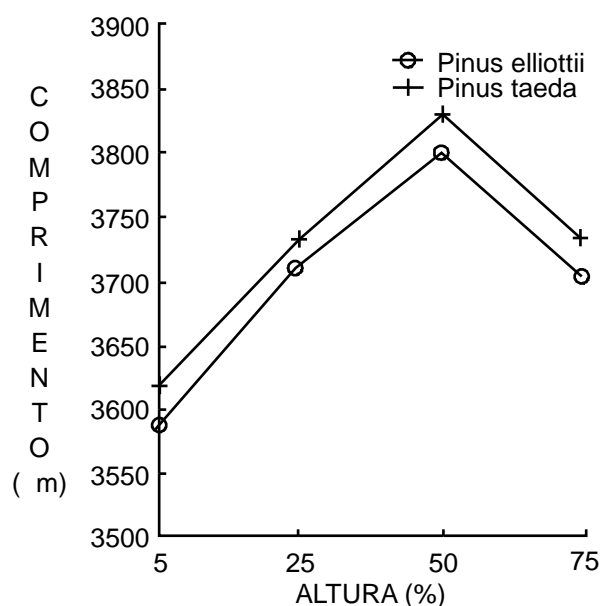


FONTE: adaptado de COWN; McCONCHIE (1980)

De uma maneira geral, o comprimento das fibras de coníferas varia, em média, de 2,5 a 5,0 mm (PANSWIN; DE ZEEUW, 1980). As espécies do gênero *Pinus* apresentam, no sentido axial, tendência de aumento do comprimento de fibras até o meio do tronco, decrescendo a partir daí, em direção à copa (DINWOODIE, 1965; DADSWELL; NICHOLS, 1960; COWN, 1975; TOMASELLI, 1979; MENDONÇA, 1982; CORSON, 1984; MUÑIZ, 1993). Esta redução axial no comprimento das fibras se deve à alta concentração de hormônios de crescimento (auxinas) nas regiões próximas à copa, induzindo os meristemas apicais,

responsáveis pelo crescimento em altura, a divisões aceleradas das células que antes de atingirem seu comprimento potencial, sofrem nova divisão. A Figura 3 ilustra o esquema de variação do comprimento de fibras ao longo do tronco.

FIGURA 3 - VARIÇÃO DO COMPRIMENTO DE FIBRAS DE *P. taeda* E *P. elliottii* AO LONGO DO TRONCO.



Fonte: MUÑIZ (1993)

No que diz respeito às relações com as características dos produtos, o comprimento de fibras está diretamente relacionado à resistência ao rasgo da celulose, pasta e papel (DINWOODIE, 1965; LARSON et al., 2001) e em menor grau à tração, podendo também ser importante fator na qualidade da madeira de produtos sólidos. Fibras longas com menores ângulos fibrilares resultam em painéis mais resistentes e mais estáveis (ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989).

A largura ou diâmetro externo das fibras e o diâmetro do lume (diâmetro interno), também são propriedades influenciadas pela taxa de crescimento e pela idade das árvores. Em períodos de alto ritmo de crescimento, propiciado por condições edáficas, climáticas ou genéticas, as fibras produzidas pela região cambial são largas, com acentuados diâmetros de lume. Como as árvores apresentam um alto ritmo de crescimento nos primeiros 10 - 12 anos de vida e, posteriormente, tende a estagnar, as fibras mais largas e com maiores diâmetros de lume estão mais restritas à região interna do tronco (COWN, 1975; BARRICHELO,

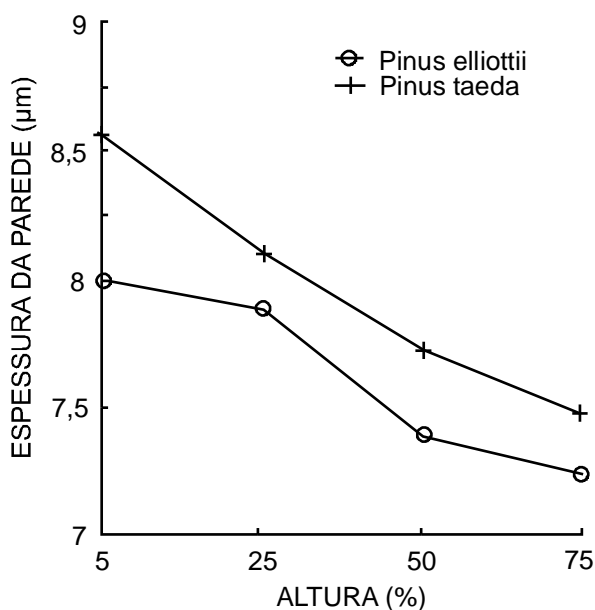
1979; PANSWIN; DE ZEEUW, 1980; COWN, 1992) mais especificamente na madeira juvenil (CORSON, 1984; CORSON, 1991; MUÑIZ, 1993; KLOCK, 2000). No sentido base-topo, há um aumento de ambas as dimensões (COWN, 1975), influenciadas pelo crescimento apical e pela copa da árvore. MUÑIZ (1993) estudando a madeira de *P. taeda* aos 30 anos de idade, observou acréscimos na largura e diâmetro do lume das fibras até o meio do tronco, e à partir desta posição decresceram em direção ao topo. Ambas as dimensões apresentam as mesmas tendências de variação dentro do tronco, estando fortemente correlacionadas, indicando que as fibras mais largas são também as de maior diâmetro de lume (KARTH, 1967; COWN, 1975; TOMASELLI, 1979; KIBBLEWHITE, 1980; KIBBLEWHITE, 1982; KIBBLEWHITE; LLOYD, 1983). Estas correlações são mais fortes ainda na madeira juvenil. Segundo KIBBLEWHITE (1984), fibras largas e com grandes diâmetros de lume são bastante flexíveis, se colapsam e se entrelaçam facilmente na formação de papel, resultando em boa resistência à tração e estouro, além disso, são fáceis de serem trabalhadas durante o refino da celulose/pasta.

De uma maneira geral, o diâmetro das fibras em coníferas varia entre 20  $\mu$ m e 60  $\mu$ m, sendo que para *P. taeda* são encontrados valores médios entre 40  $\mu$ m e 50  $\mu$ m e de 25  $\mu$ m a 35  $\mu$ m para o diâmetro do lume (BARRICHELO, 1979; TOMASELLI, 1979; MUÑIZ, 1993; KLOCK, 2000).

Com respeito à espessura da parede, uma fibra é formada pelas paredes primária e secundária. Durante o crescimento em comprimento (crescimento superficial), a fibra apresenta apenas a parede primária, com espessura variando entre 0,1  $\mu$ m e 0,2  $\mu$ m, representando apenas 2 % da parede celular quando comparada à fibra em estágio mais avançado. A parede secundária se forma após o crescimento superficial ter cessado e seu espessamento ocorre com a deposição de carboidratos, principalmente quando o crescimento da árvore é lento (PANSWIN; DE ZEEUW, 1980; SHIMOYAMA, 1990). A parede secundária, que pode representar até 90 % da espessura total, consiste de três camadas, a mais externa, denominada S1, com espessura variando entre 0,2  $\mu$ m e 0,3  $\mu$ m; a intermediária S2, com espessura entre 5  $\mu$ m e 10  $\mu$ m para coníferas e a interna S3, com aproximadamente 1  $\mu$ m. Igualmente às demais dimensões, a espessura da parede também é influenciada por fatores genéticos e ambientais, especialmente quando estes interferem no ritmo de crescimento. No sentido axial, da base para o topo das

árvores, há uma redução na espessura da parede das fibras (BARRICHELO, 1979; MUÑIZ, 1993) com o aumento na largura e diâmetro do lume, influenciado pelo crescimento em altura. Fibras formadas em períodos de alto crescimento são largas, com significativos diâmetros de lume e baixa espessura da parede (ERICKSON; HARRINSON, 1974). A variação axial da espessura da parede das fibras para espécies de *Pinus* é ilustrada na Figura 4.

FIGURA 4 - VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA PAREDE DAS FIBRAS DE *P. taeda* e *P. elliottii* AO LONGO DO TRONCO.



Fonte: MUÑIZ (1993)

A espessura da parede celular também é afetada pela idade da árvore, apresentando um aumento linear com o incremento em idade. Conforme mencionado anteriormente, o tecido cambial mais velho, produz também células com características adultas, apresentando maior espessura de parede (COWN, 1980). Dessa forma, as coníferas tendem a aumentar a espessura da parede do centro (madeira juvenil) para a região externa do tronco (madeira adulta) (KARTH, 1967; COWN, 1975; BARRICHELO, 1979; TOMASELLI, 1979; KIBBLEWHITE, 1980; KIBBLEWHITE, 1982; KIBBLEWHITE, 1984; CORSON, 1984; KIBBLEWHITE; LLOYD, 1983; CORSON, 1991; COWN, 1992; MUÑIZ, 1993; KLOCK, 2000; HASSEGAWA, 2003).

Tanto no sentido radial, quanto axial, a espessura da parede apresenta variação oposta à largura e diâmetro do lume das fibras, indicando que as fibras mais largas e com os maiores diâmetros de lume apresentam paredes mais delgadas (PANSIN; DE ZEEUW, 1980; BARRICHELO, 1979; SHIMOYAMA, 1990).

Quanto às influências no produto final, a espessura da parede das fibras encontra-se diretamente relacionada às resistências mecânicas da celulose/pasta e papel. Quanto maior a espessura da parede, maior é a resistência ao rasgo (COWN; KIBBLEWHITE, 1980; KIBBLEWHITE; LLOYD, 1983; CORSON, 1991), entretanto, fibras espessas, são, em geral, rígidas e não apresentam bom desempenho nos processos de refino e não se colapsam, tendendo a manter sua forma tubular na formação do papel, reduzindo significativamente a resistência à tração (KIBBLEWHITE, 1972; KIBBLEWHITE, 1974; KIBBLEWHITE, 1980). Em termos de produtos estruturais, a espessura da parede também influencia as resistências mecânicas da madeira.

### 2.1.2 Relações Entre as Dimensões de Fibras

Muitas vezes, as dimensões de fibras, isoladamente, podem não apresentar correlações significativas com a qualidade do produto final, especialmente da celulose, pasta e do papel. Porém, ao agrupá-las as influências são mais acentuadas, podendo ser obtidas correlações significativas. Este agrupamento sob diversas formas resulta em índices que auxiliam na interpretação da qualidade da madeira e da pasta. Segundo FOELKEL (1976), as relações entre as dimensões das fibras têm sido de considerável interesse na interpretação da qualidade da celulose e papel, podendo auxiliar na explicação dos resultados para as resistências do produto final e, inclusive, na identificação e seleção de madeiras.

Os principais índices são: índice de Runkel, fração parede, coeficiente de flexibilidade e índice de enfiamento.

O índice de Runkel (IR) é definido como sendo a relação entre a espessura da parede (EP) e o respectivo diâmetro do lume da fibra (DL), conforme expressão que segue.

$$IR = \frac{2 \times EP}{DL}$$

Este índice apresenta alta correlação negativa com a largura das fibras devido à relação inversa entre a espessura da parede e a largura das fibras. Fibras mais largas apresentam, em geral, menor espessura da parede e conseqüentemente menor índice de Runkel (KARTH, 1967; COWN, 1975; KIBBLEWHITE, 1980; KIBBLEWHITE, 1982; KIBBLEWHITE; LLOYD, 1983).

A fração parede (FP) é definida pela relação percentual entre a espessura da parede (EP) e a largura da fibra (L):

$$FP = \frac{2 \times EP}{L} \times 100$$

O índice de Runkel e a fração parede encontram-se relacionados à rigidez da fibra, isto é, quanto maior os seus valores, mais rígida pode se tornar a fibra. Dependendo do grau, a rigidez das fibras pode exercer influências sobre as propriedades mecânicas do papel. Considera-se que uma fibra apresenta boa qualidade para produção de papel e celulose, com boa resistência à tração, se o índice de Runkel for abaixo de 0,5 e a fração parede abaixo de 40 (FOELKEL; BARRICHELO, 1975; FOELKEL, 1976).

O coeficiente de flexibilidade (CF) relaciona o diâmetro do lume (DL) e a largura da fibra (L), sendo calculado pela expressão:

$$CF = \frac{DL}{L} \times 100$$

Finalmente, o índice de enfeltramento é o quociente entre o comprimento e a largura das fibras. O coeficiente de flexibilidade e o índice de enfeltramento medem o quão flexíveis são as fibras e a sua capacidade de entrelaçamento, sendo, portanto, índices importantes para fabricação de celulose e papel (FOELKEL, 1976; KLOCK, 2000), e se correlacionam de forma negativa com a espessura da parede das fibras. Segundo DINWOODIE (1965), a flexibilidade das fibras exerce influência direta e positiva na resistência à tração e ao estouro da celulose/pasta. A mesma influencia é exercida pelo índice de enfeltramento.

De acordo com a fórmula de determinação, o índice de enfeltramento apresenta relação inversa com a largura da fibra. Como a largura é altamente relacionada ao diâmetro do lume, conseqüentemente há uma correlação negativa entre índice de enfeltramento e diâmetro do lume.



## 2.2 PROPRIEDADES MORFOLÓGICAS

### 2.2.1 Percentual de Lenhos

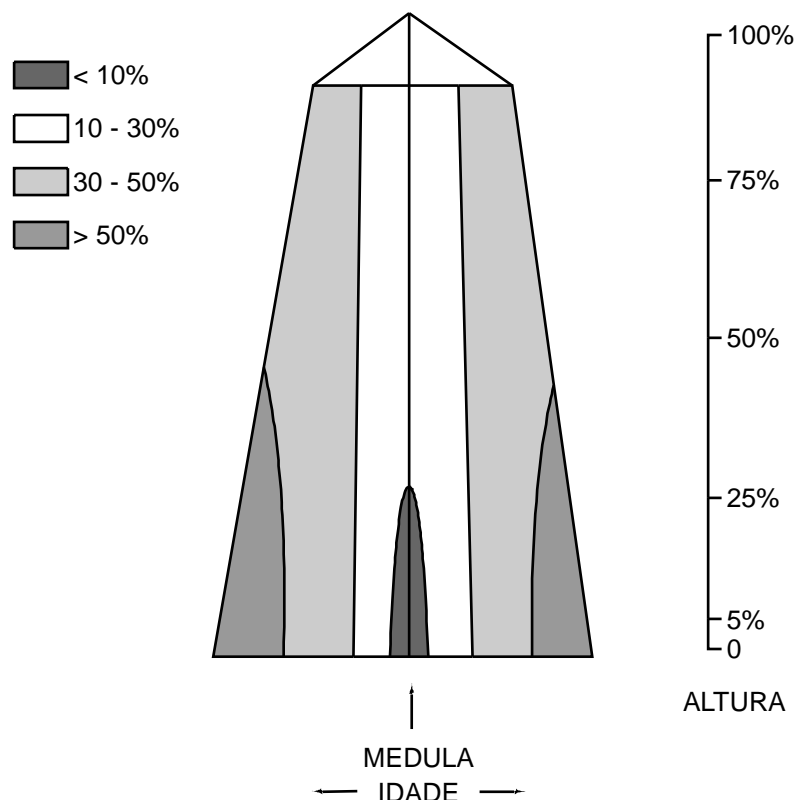
A cada ano, são depositadas duas camadas de madeira entre a casca e a madeira propriamente dita (xilema). Estas camadas são denominadas de anéis de crescimento. Quando formadas no outono-inverno são chamadas de lenho tardio ou outonal, e na primavera-verão são denominadas de lenho inicial ou primaveril. Nas estações primavera e verão, período com maior disponibilidade de luz, calor e água no solo, a taxa hormonal aumenta e a planta apresenta um intenso crescimento vegetativo, induzindo as células cambiais a rápidas divisões, sem tempo suficiente para aumentos em comprimento e em espessura da parede antes da próxima divisão. Dessa forma, as fibras do lenho inicial são mais curtas, mais largas, com acentuados diâmetros de lume e paredes finas, apresentando menores índice de Runkel, fração parede e índice de enfiamento e maior coeficiente de flexibilidade. No final do período vegetativo (outono-inverno) a planta reduz sua atividade vegetativa, produzindo lenho tardio com fibras espessas, menos largas, com diâmetro de lume significativamente inferior e aspecto mais escuro (WATSON; DADSWELL, 1961; COWN, 1975; FOELKEL, 1976; PANSIN; DE ZEEUW, 1980; MUÑIZ, 1993; KLOCK, 2000; LARSON, et al., 2001; HASSEGAWA, 2003). Essas fibras apresentam também maior índice de Runkel, índice de enfiamento e fração parede e menor coeficiente de flexibilidade.

Os percentuais de lenhos também são influenciados pela idade da árvore. Nos primeiros anos o ritmo de crescimento é elevado, formando-se maior percentual de lenho inicial. Quando a árvore tende à maturidade, há um aumento relativo no percentual de lenho tardio. Dessa forma, a madeira juvenil apresenta maior percentual de lenho inicial e a madeira adulta, maior percentual de lenho tardio, com fibras mais longas e mais espessas (COWN, 1980; KIBBLEWHITE, 1982; KIBBLEWHITE; LLOYD, 1983; COWN et al., 1983; COWN; MCCONCHIE, 1983; CORSON, 1984; CORSON, 1991). Dessa forma, há uma tendência de redução no percentual de lenho inicial e aumento no lenho tardio no sentido medula-casca.

Os percentuais de lenhos inicial e tardio também variam no sentido axial, aumentando o lenho inicial em direção à copa da árvore (MENDONÇA, 1982;

MUÑIZ, 1993; KLOCK, 2000; LARSON, et al., 2001; HASSEGAWA, 2003), o que explica a maior largura, maior diâmetro do lume e menor espessura da parede das fibras em alturas mais elevadas do tronco. A Figura 5 ilustra a tendência de variação para o lenho tardio no sentido axial.

FIGURA 5 – VARIÇÃO DO PERCENTUAL DE LENHO TARDIO DENTRO DE ÁRVORES DE *P. taeda* E *P. elliotii*



Fonte: MUÑIZ (1993)

Os percentuais de lenho inicial e tardio são propriedades importantes, tanto na produção de celulose e papel, quanto na obtenção de produtos, como laminados, componentes de portas e janelas, etc. Na produção de celulose/pasta e papel, uma maior porcentagem de lenho tardio proporciona maior resistência ao rasgo e menor tração (KIBLLEWHITE, 1972; KIBLLEWHITE, 1974, COWN; McCONCHIE, 1982). Além disso, quanto maior o percentual de lenho tardio, maior é o rendimento destes produtos (BARRICHELO, 1979; KLOCK, 2000). Se a característica mais importante for a resistência à tração, maior porcentagem de lenho inicial é desejável. Para serrados e laminados a relação lenho inicial/lenho tardio pode apresentar problemas

na resistência mecânica, na dureza do material e, inclusive problemas durante a secagem.

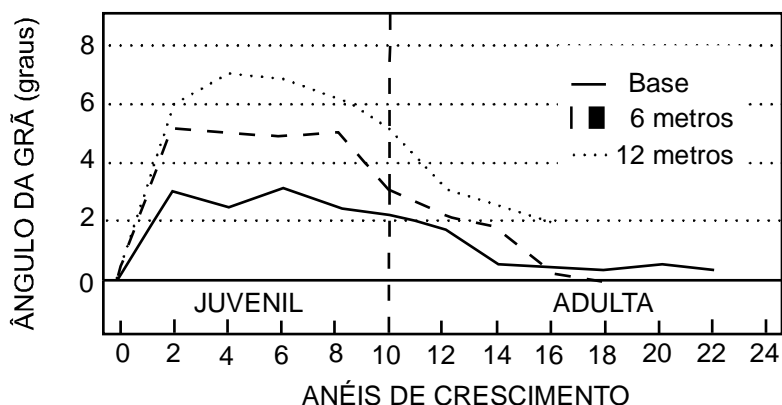
### 2.2.2 Ângulo de Grã

O ângulo de inclinação da grã é a medida do desvio dos tecidos componentes da madeira, especialmente das fibras, em relação ao eixo longitudinal do tronco ou de peças de madeira. Esta propriedade tem principal efeito sobre o valor e utilidade da madeira, sendo especialmente importante para produtos sólidos. Quando o ângulo é alto, praticamente impossibilita a manufatura de determinados produtos devido a empenamentos, rachaduras ou quebras. Em produtos estruturais, exerce influências sobre as resistências mecânicas. Madeiras com maiores inclinações de grã são mais frágeis, aumentando a tendência para empenamento com a variação no teor de umidade (CURRY; COVINGTON, 1974), além de prejudicar a aparência dos produtos acabados.

A grã espiralada ocorre comumente em coníferas e, freqüentemente, segue uma espiral à esquerda, isto é, inclina-se à esquerda em relação ao eixo axial das árvores. É comum no gênero *Pinus*, aparecendo em muitas espécies, porém, em algumas, como o *Pinus taeda* tem pouca importância (BAMBER; BURLEY, 1983). DADSWELL; NICHOLLS (1960) determinaram um ângulo de grã de 7° como sendo o limite aceitável para a qualidade de produtos sólidos. Freqüentemente, algumas coníferas excedem esse valor. COWN et al. (1983) encontraram ângulo de grã excedendo 5° em *P. caribaea* var. *hondurensis*. Quanto à tendência de variação da grã, BAMBER; BURLEY (1983) verificaram que o ângulo é maior na região central do tronco.

As variações para grã foram estudadas em *P. radiata* por COWN et al. (1991). No sentido radial, os autores verificaram que os maiores ângulos são observados na região próxima à medula, na madeira juvenil (Figura 6) e esta propriedade também aumenta com a altura da árvore. Os autores relatam que a grã espiral é um problema sério nas toras jovens.

FIGURA 6 - VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE GRÃ NO SENTIDO RADIAL



Fonte: COWN (1992)

HALSLETT et al. (1991) salientam que há chance de seleção através de melhoramento para reduzir os impactos do ângulo de grã em produtos serrados, trazendo, inclusive, ganhos econômicos.

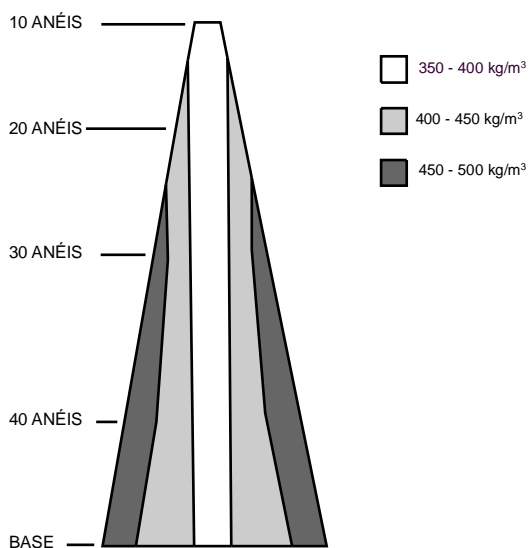
### 2.3 DENSIDADE BÁSICA

A densidade básica da madeira, também denominada de massa específica básica, é tida, pelas indústrias de base florestal, como uma das mais importantes propriedades por ser de fácil determinação e por estar correlacionada com rendimentos e características de diversos produtos, além de ser alterada através de tratamentos silviculturais e manipulada geneticamente (WILLIAMS; HAMILTON, 1961; ZOBEL, 1961). Esta propriedade física, definida como a relação entre o peso seco da madeira e o seu volume obtido acima do ponto de saturação das fibras, é resultante das características químicas, anatômicas e morfológicas, tais como as dimensões das fibras (comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume); teor de lignina, holocelulose e extrativos; percentuais de lenho inicial e tardio; teor de madeira juvenil, adulta, dentre outros (KARTH, 1967; BARRICHELO, 1979; ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989; SHIMOYAMA, 1990; MUÑIZ, 1993; KLOCK, 2000). Portanto, a densidade básica também é influenciada pelas condições de crescimento da árvore, considerando-se o solo, clima, práticas silviculturais, variando entre espécies, povoamentos, entre e dentro das árvores, no sentido radial e axial.

A densidade básica apresenta forte relação positiva com a espessura da parede das fibras (KARTH, 1967; COWN, 1975; BARRICHELO, 1979; TOMASELLI, 1979; KIBBLEWHITE, 1980; LARSON, et al., 2001). Os carboidratos que são depositados na parede da fibra, durante seu espessamento, possuem alto grau de polimerização e alto peso molecular, tornando a madeira mais densa. Por outro lado, esta propriedade apresenta forte relação negativa com a largura e diâmetro do lume (BARRICHELO, 1979; SHIMOYAMA, 1990), onde as fibras mais largas, com maior diâmetro do lume apresentam maiores espaços vazios por unidade de área e, conseqüentemente, são menos densas. Como conseqüência destas correlações com as dimensões das fibras, a densidade básica se relaciona positivamente com o índice de Runkel e negativamente com o coeficiente de flexibilidade e índice de enfeltramento. No sentido radial, a densidade básica tende a aumentar com o aumento da espessura da parede e redução do diâmetro do lume (COWN, 1975; BARRICHELO, 1979; TOMASELLI, 1979; CORSON, 1984; PANSIN; DE ZEEUW, 1980; ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989; SHIMOYAMA, 1990; CORSON, 1991; COWN, 1992; MUÑIZ, 1993; KLOCK, 2000) e diminui da base para o topo das árvores (COWN; McCONCHIE, 1980; COWN; McCONCHIE, 1983; CORSON, 1984; MUÑIZ, 1993; KLOCK, 2000; HASSEGAWA, 2003). Estas tendências são ilustradas nas Figuras 7.

No que diz respeito às relações entre a densidade básica e o comprimento de fibras, SMITH (1959) verificou que ambas as propriedades são independentes. DINWODIE (1965) e LARSON et al. (2001) observaram fraca correlação negativa. Entretanto, a maior parte das pesquisas sobre o assunto detectou correlação positiva entre a densidade básica e o comprimento das fibras (KOCH, 1972; KIBBLEWHITE, 1980; KIBBLEWHITE; LLOYD, 1983). Muitas vezes, as correlações positivas observadas entre duas propriedades, mostram apenas que as mesmas possuem um aumento paralelo dentro da árvore (CARPIM, et al., 1985), podendo ser o caso desta relação.

FIGURA 7 - ESQUEMA DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DENTRO DA ÁRVORE – *P. radiata*



Fonte: COWN; McCONCHIE (1980)

Quanto à variação da densidade básica nos lenhos inicial e tardio, como mencionado no item 2.2.1, as fibras do lenho tardio são significativamente mais espessas que as do lenho inicial, conferindo-lhe uma maior densidade básica. Vários estudos têm demonstrado esta forte relação direta entre a densidade e o lenho tardio (HIGGINS et al., 1973; BARRICHELO, 1979; MUÑIZ, 1993; KLOCK, 2000; LARSON et al., 2001; HASSEGAWA, 2003). A mesma relação é observada entre a densidade básica e a madeira adulta que também apresenta fibras mais espessas que a madeira juvenil (KIBBLEWHITE; LLOYD, 1983; COWN; McCONCHIE, 1983; COWN, 1980; CORSON, 1984; CORSON, 1991; KIBBLEWHITE, 1982). A relação entre a densidade básica e os percentuais de lenho inicial e madeira juvenil é negativa, pois as fibras de ambos os lenhos apresentam paredes finas e acentuado diâmetro de lume, resultando em maior quantidade de espaços vazios, o que reduz significativamente a massa por unidade de volume, ou a densidade da madeira.

No setor de celulose e papel, a densidade básica se relaciona ao rendimento e qualidade dos produtos. Madeira com maiores densidades apresentam maior rendimento em celulose/pasta, maior resistência ao rasgo e menor resistência à tração e estouro (FOELKEL, 1976; KIBBLEWHITE, 1980).

No que diz respeito à madeira estrutural, a densidade básica se relaciona diretamente às propriedades de resistência, tanto da madeira verde, quanto seca, tendo suas resistências aumentadas com incrementos na densidade básica.

## 2.4 NÓS

Uma importante fonte de variação da madeira é a presença dos nós e, sua frequência, tamanho, posição e o tipo (vivo ou morto) determinam a qualidade da madeira, principalmente na obtenção de produtos sólidos. Na indústria de celulose/pastas estes defeitos são, às vezes, menos importantes, sendo separados no início do processo ou mesmo desagregados nos processos químicos. O nó é definido como uma porção de galho incorporado no tronco da árvore e, consiste basicamente de fibras de madeira de compressão, as quais são morfologicamente diferentes das fibras de madeira normal. A madeira que compreende a região de nós apresenta desvios acentuados de suas células, formando alto ângulo de grã, irregularidades nos anéis de crescimento, além de descontinuidade entre o nó e a madeira circundante, resultando em redução da resistência (THUNELL, 1958). Os nós também apresentam baixo teor de umidade, com uma densidade básica duas vezes maior àquela de madeira normal e alto teor de extrativos (SAHLBERG, 1995), influenciando também as características superficiais da madeira. Por esse motivo, BROWN (1979), considerou os nós como o mais sério defeito da madeira de *P. radiata*.

A literatura dispõe de poucos estudos que quantificam os nós da madeira, especialmente para o gênero *Pinus*. Na tentativa de explicar a escassez de bibliografia sobre o assunto, BOUTELJE (1965) mencionou o comentário de um participante em um congresso de genética em Stockholm, que ainda persiste nos dias atuais:

“Nós não sabemos muito sobre nós da madeira, mas nós sabemos que não os queremos...”.

Os nós estão relacionados a fatores genéticos, variando entre espécies, podendo ser controlado por práticas silviculturais, tais como, espaçamentos e

desramas. Estudos buscando técnicas para redução dos nós na madeira têm questionado a qualidade e viabilidade econômica das técnicas de desrama como forma de reduzir o problema. Os povoamentos comerciais plantados em estreitos espaçamentos iniciais apresentam uma desrama natural na parte inferior do tronco. Com o crescimento da árvore em diâmetro os nós ficam restritos à região interna da árvore, ou seja, na madeira juvenil. Segundo COWN (1992) uma das implicações do uso de madeira da região interna do tronco (madeira juvenil) é a presença de grande quantidade de nó. A quantidade de nós aumenta substancialmente com a altura do tronco, na direção da copa da árvore (LARSON et al., 2001), contribuindo para redução do valor das toras obtidas a determinada altura do fuste.

BAMBER; BURLEY (1983), consideram que o principal efeito dos nós é afetar a orientação da grã. Por outro lado, os nós reduzem significativamente as resistências da madeira dependendo da sua dimensão, solidez e localização relativa na peça (IWAKIRI, 1982). De acordo com KOLLMANN; COTÉ (1968), os nós reduzem o valor do módulo de ruptura das vigas de madeira sólida, submetida à flexão, principalmente se eles estiverem localizados na área tracionada, próximo à secção transversal crítica. Além disso, eles prejudicam a aparência e qualidade da maioria dos produtos acabados, reduzindo, muitas vezes, o rendimento final.

## 2.5 TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA

A avaliação não destrutiva tem sido usada na área florestal para uma série de finalidades, desde a matéria-prima bruta até a classificação de produtos dentro das indústrias, além de outras aplicações como avaliação “in loco” de partes de madeira ou estruturas montadas, postes e, até mesmo, árvores ornamentais. Várias pesquisas têm sido desenvolvidas com técnicas não destrutivas para avaliação das propriedades da madeira, especialmente para propriedades físicas, mecânicas e defeitos. Por definição, avaliação não destrutiva é uma técnica de identificação das propriedades de um determinado material sem alterar sua capacidade de uso futuro, utilizando as informações para tomadas de decisões com relação às aplicações apropriadas do material avaliado (ROSS, et al., 1998). As vantagens dos métodos não destrutivos sobre os métodos tradicionais são significativas, destacando-se a



possibilidade de utilização posterior da peça testada; a rapidez de aplicação do método; a confiabilidade dos valores obtidos; redução das perdas de material; classificação de peças em classes de qualidade e resistência; detecção de defeitos internos antes do beneficiamento, além das vantagens financeiras proporcionadas pelo conjunto de vantagens citadas.

Todo método não destrutivo usa alguma forma de propagação de energia através ou em volta de um material para deduzir algumas características importantes do material examinado. Esta energia pode resultar de cargas estáticas ou dinâmicas ou ser geradas por ondas eletromagnéticas ou elásticas (SCHAD et al., 1996).

A hipótese fundamental para avaliação não destrutiva de produtos de madeira foi inicialmente proposta por JAYNE em 1959, ao verificar que as propriedades de armazenamento e dissipação de energia da madeira, que podem ser medidas de forma não destrutiva, através de uma série de técnicas estáticas e dinâmicas, são controladas pelos mecanismos que determinam as propriedades mecânicas deste material. Estas propriedades, especialmente o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR) são relacionados, nesta teoria, com a energia armazenada e com a dissipação de energia, respectivamente (MATOS, 1997). Dessa forma, relações matemáticas entre essas propriedades puderam ser estabelecidas. A medição dos fatores de dissipação sob condições de baixa tensão torna possível a estimativa das propriedades de resistência, que são, normalmente, determinadas pela complexa ruptura do material, no caso dos métodos destrutivos (PELLERIN, 1965).

Várias técnicas são classificadas como métodos não destrutivos, tais como:

a) Métodos visuais

Os métodos visuais, uns dos mais simples, mais antigos e mais utilizados métodos não destrutivos para classificação de madeiras, permitem identificar facilmente características como a cor e presença de defeitos, tais como podridões e nós, considerando-se o tamanho, número e localização dos mesmos. Esse método ainda é muito utilizado para uma classificação geral, com objetivo de eliminar problemas e defeitos graves da madeira que possam interferir significativamente nos processos de obtenção de produtos. Apesar de bastante útil, o mesmo apresenta algumas limitações, identificando apenas valores

qualitativos, sendo que as reais condições do material podem não ser detectadas, uma vez que a avaliação fica limitada às faces externas da madeira, não garantindo sua performance durante o uso. Além disso, os parâmetros são bastante subjetivos, o que exige treinamento para realização das avaliações.

#### b) Métodos químicos

Esses métodos consistem na avaliação da composição química da madeira ou de outros materiais e eficiência de tratamentos como preservativos e retardantes de fogo. Além da avaliação residual de produtos, estes testes propiciam também a avaliação da degradação química de madeira atacada por fungos decompositores.

#### c) Método mecânico

Trata-se de um método pioneiro e um dos mais populares métodos não destrutivos utilizados para madeira. A avaliação das madeiras está baseada no princípio de correlação entre a resistência, representada pelo módulo de ruptura (MOR) e a elasticidade, obtida em teste de flexão estática, representada pelo módulo de elasticidade (MOE). Neste método, a peça de madeira é flexionada por poucos instantes na máquina de classificação, o necessário para medir seu valor de rigidez, que permite estimar a resistência à flexão da peça através da correlação entre o MOE e o MOR (GORNIAK; MATOS, 2000). O parâmetro não destrutivo mais utilizado tem sido o MOE, algumas vezes associado à densidade aparente. O método apresenta como ponto negativo, a complexidade e custo desta tecnologia, não sendo acessível a pequenas indústrias madeireiras.

#### d) Métodos físicos

Entre os diversos testes físicos de avaliação não destrutiva inclui-se de resistência elétrica, propriedades dielétricas, resistência física (à penetração de materiais), raio-x, propriedades ópticas, vibracionais e acústicas, destacando-se as técnicas:

- Pilodyn

O Pilodyn é um equipamento que mede a resistência da madeira à penetração de materiais. Este método fornece informações como as condições

físicas de postes, árvores, toras, elementos estruturais, etc. A aplicação consiste na introdução gradual de um pino no material. A resistência oferecida pelo material durante a introdução é registrada em um computador e descrita na forma de gráfico, cujas coordenadas são a medida de penetração (mm) e unidades arbitrárias de resistência (%). Com as informações obtidas, é possível calcular a densidade da madeira (GORNIAK; MATOS, 2000).

- Técnicas vibracionais

A teoria da técnica de vibração prediz que todos os materiais possuem uma frequência natural de vibração. Um significativo desvio desta vibração teórica natural é um indicador de possível dano ou defeito neste material. A relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a frequência natural de vibração pode ser expressa pela equação apresentada por GÖRLACHER (1984):

$$MOEd = \frac{4\pi^2 \times L^4 \times f^2 \times \delta}{m_n^4 \times i^2} \times \frac{1 + i^2}{L^2 \times k_1}$$

em que,

MOEd: módulo de elasticidade dinâmico

$\delta$  : massa específica

L : comprimento da peça de madeira biapoiada

f : frequência natural

$m_n, k_1$  : constante de vibração em módulo 1

- Técnicas ópticas

Entre as técnicas ópticas, destaca-se o UVvis (ultravioleta visível), scanner, laser e os infra-vermelhos espectros, infravermelho fundamental (IR) e próximo (NIR), especialmente o NIR (near infrared).

A espectroscopia de infravermelho próximo é baseada na absorção pelo material de luz infravermelho próximo (comprimento de ondas de 750 a 2500 nm). Quando um material é irradiado com luz infravermelha há vibrações moleculares. A energia absorvida é específica para diferentes tipos e intensidades de vibrações e depende do meio químico dos grupos moleculares. Portanto, diferentes moléculas e grupos moleculares absorvem radiação com energia diferente, isto é, com diferentes

comprimentos de ondas. A refletância da luz para cada comprimento de onda é medida com um espectrômetro e é utilizada para o cálculo da absorção. O espectro de absorção obtido dá informação sobre as moléculas ou grupos moleculares envolvidos (SO et al., 2004). O espectro na região infravermelho próximo não é de fácil interpretação, pois contém um alto número de bandas de fortes sobreposições. Entretanto, o mesmo contém informação sobre a molécula toda ou o sistema molecular. A energia absorvida pelo material é correlacionada com a propriedade desejada. Entretanto, este método apresenta alguns aspectos que dificultam determinadas análises, tais como:

- ∅ Necessidade de uma curva do espectro para associar a cada material a ser analisado e no caso da madeira varia de acordo com a espécie, idade, ritmo crescimento, tipo de amostra (sólida, serragem, disco, bagueta, etc);
  - ∅ Qualquer erro de determinação da variável para formação da curva de calibragem é levado para o método;
  - ∅ Necessidade de ajustes/calibração (associação de espectros) para cada propriedade a ser avaliada;
  - ∅ Proporciona uma avaliação superficial e pontual na madeira, apenas onde a luz penetra, não detectando defeitos ou variações internas.
- Técnicas acústicas (ultra-som e ondas acústicas ou de tensão)

Uma onda sonora pode ser propagada dentro de um material por diversas formas. Primeiramente, o som pode ser produzido pelo próprio material como resultado do movimento rápido da porção estressada. Os sons emitidos e sua propagação estão relacionados ao efeito dinâmico de qualquer defeito dentro do material. Nesta técnica, referida como emissão acústica de inspeção, é utilizado um transdutor piezoelétrico para detectar o som. De outra maneira, o som pode ser produzido externamente pelo contato de um transdutor piezoelétrico onde as ondas geradas são recebidas por um segundo transdutor ou são refletidas para o transdutor que as produziu. As mesmas possuem frequências superiores às audíveis e, por isso, o método é referido como teste acústico-ultra-sônico ou teste ultra-sônico. Em uma terceira forma, as ondas podem ser produzidas através de impacto com um instrumento, tal como um martelo, que gera uma onda elástica ou de tensão

dentro do material. A frequência desta onda pode, ou não, ser ultra-sônica. Um “timer” conectado no ponto de impacto e no ponto de recebimento da onda, na superfície do material testado pode medir o tempo de transmissão e através deste, a velocidade das ondas de tensão (SCHAD, et al., 1996). Este método é referido como transmissão de ondas sonoras, ou emissão de ondas sonoras ou acústicas ou, ainda, de tensão. Este método é mais detalhado no item 2.6.

A maioria dos métodos não destrutivos, usados para diversos materiais, pode ser empregada para avaliação da madeira e compostos de madeira. A escolha depende da aplicação específica e da adaptabilidade (ROSS et al., 1998). Essas técnicas têm sido empregadas com sucesso para avaliação da madeira em diferentes etapas de processamento, desde a árvore em pé até os diferentes produtos obtidos.

## 2.6 TÉCNICA DE AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA POR EMISSÃO DE ONDAS DE TENSÃO

A técnica de avaliação não destrutiva de ondas de tensão vem sendo investigada há mais de 30 anos e tem sido utilizada para diversas aplicações na indústria de produtos florestais. É o método acústico mais utilizado, onde as ondas sonoras são geradas a partir de um impacto ou de vibração forçada. Devido à dificuldade de induzir uma vibração forçada ao objeto, a maioria das avaliações é conduzida com base no método de impacto (PUEHRINGER, 2002). Neste método, a aplicação e medição das ondas de tensão consiste no posicionamento de dois transdutores acelerômetros sobre o material a ser avaliado. Uma onda acústica é induzida ao material através do choque de um martelo, pêndulo ou outros materiais. Quando a onda alcança o acelerômetro de partida, uma contagem de tempo, em microssegundos, é iniciada no instrumento. Quando esta atinge o acelerômetro de parada, a contagem de tempo cessa e o aparelho registra e mostra o tempo decorrido de trânsito da onda de tensão, entre os acelerômetros, através do material (SCHAD et al., 1996; MATOS, 1997). Os tempos registrados em microssegundos são utilizados para o cálculo da velocidade de propagação das ondas, conforme expressão:

$$V = \frac{d}{t}$$

em que,

V : velocidade de propagação das ondas (m/s)

d : distância entre os transdutores ou acelerômetros (m)

t : tempo de propagação das ondas (s)

A velocidade de propagação das ondas é, muitas vezes, utilizada para determinar o módulo de elasticidade dinâmico (METRIGUARD, 1997), através da expressão:

$$MOEd = \delta \times V^2 \times \frac{1}{g}$$

em que,

MOEd : módulo de elasticidade dinâmico

$\delta$  : massa específica do material

g : aceleração da gravidade (9,804 m/s<sup>2</sup>)

V : velocidade da onda

A técnica de avaliação das propriedades da madeira, através de propagação de ondas de tensão, apresenta algumas vantagens sobre os outros métodos acústicos, especialmente no que diz respeito ao equipamento utilizado nas avaliações que é bem mais simples, portátil, facilitando a avaliação em qualquer local, inclusive no campo, com baixo custo, possibilitando a aquisição do mesmo por pequenas indústrias para avaliação não destrutiva de vários produtos de madeira.

Este método pode ser empregado para diferentes situações, desde a árvore em pé até os produtos finais obtidos (WANG et al., 2001).

### 2.6.1 Aplicação de Ondas Acústicas em Produtos Sólidos e Compostos de Madeira

Os ensaios não destrutivos, em especial a emissão de ondas de tensão, são importantes ferramentas para avaliação da qualidade de produtos de madeira, que, em função de sua eficiência e rapidez, é capaz de acompanhar a velocidade de uma linha de produção (BUCUR, 1995).

Vários estudos têm sido desenvolvidos para verificação de propriedades e classificação de produtos de madeira, incluindo pequenas amostras, como madeira “clear” (sem defeitos), madeira serrada (tábuas), madeira estrutural (vigas), lâminas e produtos compostos de madeira. Em alguns casos, a avaliação do produto acabado pode não ser possível pelos ensaios não destrutivos, como no caso de viga laminada colada. Nestas situações, os seus componentes como tábuas e lâminas, são classificados individualmente, e o produto é montado de modo que se obtenha determinadas propriedades mecânicas.

SANDOZ (1989) realizou estudos de classificação de madeiras para construção, através da técnica de ultra-som, obtendo excelentes resultados na caracterização mecânica de vigas com 3 classes de resistência, baseadas em níveis de velocidade de propagação das ondas acústicas.

MATOS (1997) estudando a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L. verificou que a aplicação de ondas sonoras para classificação de lâminas através do módulo de elasticidade dinâmico, mostrou-se altamente eficaz, contribuindo para o aumento significativo das propriedades de resistência mecânica dos painéis de lâminas paralelas testados. Outras pesquisas para classificação das propriedades mecânicas de lâminas de madeira, através de emissão acústica para produção de painéis de lâminas paralelas, obtiveram resultados similares (JUNG, 1982; CHA; PEARSON, 1994; RASMUSSEN, 1994).

MATOS et al. (2000) avaliaram as propriedades mecânicas de painéis compensados de *Pinus* spp. através de emissão de ondas de tensão e concluíram que o uso desta técnica não destrutiva permite a avaliação das propriedades de painéis compensados, mostrando-se viável e adequada, tendo apresentado bons índices de correlação entre o módulo de elasticidade estático, obtido através da técnica destrutiva, e dinâmico determinado de forma não destrutiva.

Os painéis compostos de madeira, tais como OSB, MDF e aglomerados apresentam características bastante variáveis, onde a emissão de ondas acústicas torna-se um processo mais complexo. Nestes produtos, as emissões acústicas se iniciam com uma carga menor à apresentada pela madeira sólida, provavelmente, devido à presença de resinas adesivas, um dos principais componentes da estrutura destes materiais (BUCUR, 1995).

Avaliações não destrutivas, através de emissão de ondas acústicas, têm sido utilizadas também em postes, pontes de madeiras e em outras estruturas, valorizando a aplicação direta no local onde estão montados (ROSS, 1999).

### 2.6.2 Aplicação de Ondas Acústicas em Toras

As pesquisas sobre a técnica de aplicação de ondas de tensão se estenderam para as toras. Estudos vêm sendo conduzidos com o objetivo de selecionar toras com propriedades desejadas para determinados produtos. Um dos primeiros trabalhos (GALLIGAN et al., 1967) classificou toras de “Douglas-fir” (*Pseudotsuga menziesii*) com relação às propriedades mecânicas, com excelentes resultados. Utilizando a técnica de aplicação de ondas de tensão, vários outros estudos mostraram boas correlações ( $R^2 = 0,44$  a  $0,89$ ) para o módulo de elasticidade entre toras e pequenas amostras retiradas das mesmas toras (ROSS, et al., 1997; SANDOZ; LORIN, 1994).

SCHAD et al. (1996) testando métodos não destrutivos em toras de “Balsam-fir” (*Abies balsamea*, L.) e “White spruce” (*Picea glauca*, Moench) concluiu que a emissão ou transmissão de ondas acústicas é uma técnica eficiente na detecção de defeitos da madeira, sendo obtidas longas ondas com menores velocidades para as toras defeituosas. JANG (2000) verificou uma razoável correlação entre os parâmetros não destrutivos das toras (velocidade de propagação das ondas de tensão e módulo de elasticidade dinâmico) com as propriedades não destrutivas e destrutivas (velocidade das ondas, módulo de elasticidade dinâmico e estático) da madeira obtida das mesmas toras. ROSS et al. (1999) estudando métodos de avaliação não destrutivos na madeira de *Pinus ponderosa*, obtiveram correlação significativa ( $R^2$  igual a  $0,86$ ) entre o tempo de propagação das ondas de tensão determinados nas toras com os valores obtidos nas lâminas, após processo de laminação, indicando que é possível estimar a qualidade potencial das lâminas através da avaliação não destrutiva das propriedades das toras. Resultado semelhante foi observado por RIPPY et al. (2000) estudando toras e lâminas de “Douglas-fir”, porém com menores coeficientes de correlação.



### 2.6.3 Aplicação de Ondas Acústicas em Árvores em Pé

Há um grande interesse por parte dos pesquisadores no desenvolvimento de método adequado de avaliação das propriedades de árvores em pé. Considerável economia, tanto em matéria-prima, quanto em processo, pode ser obtida se as propriedades da madeira fossem determinadas em árvores em pé, através de métodos não destrutivos, podendo-se prever e antecipar a qualidade do produto final. Entretanto, sabe-se que uma árvore apresenta uma estrutura bastante complexa e com grandes variações no formato, tamanho e propriedades. Além disso, a presença da casca, galhos e raízes criam muitas dificuldades geométricas e heterogeneidades para a utilização dos métodos não destrutivos. Segundo WANG et al. (2001), as árvores em pé tendem a apresentar variáveis externas e condições adversas que podem interferir com maior intensidade na avaliação das propriedades da madeira através da aplicação de ondas de tensão, quando comparadas com produtos acabados. Entretanto, os autores salientam que é possível adaptar o método para uma avaliação mais eficiente e eficaz. Em sua pesquisa com árvores de “Western hemlock” (*Tsuga heterophylla*) e “Sitka spruce” (*Picea sitchensis*), foi observada alta correlação entre a velocidade de propagação das ondas de tensão e módulo de elasticidade, determinados na árvore em pé, com aqueles obtidos em amostras retiradas das mesmas árvores após o abate, indicando que a avaliação das propriedades na árvore em pé é eficiente e confiável.

CALORI; DIAS (2000) utilizaram equipamento de ultra-som para a determinação expedita da densidade básica da madeira em árvore em pé de *Eucalyptus grandis*, aos 14 anos de idade. Foram obtidas altas correlações da densidade determinada na árvore em pé com a obtida em discos retirados das mesmas árvores, demonstrando que a metodologia pode ser aplicada efetivamente no processo de seleção de árvores em pé para a propriedade densidade básica, reduzindo custos de operações e análises comparados aos métodos tradicionais de determinação desta propriedade.

## 2.7 INFLUÊNCIAS DAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA SOBRE A PROPAGAÇÃO DE ONDAS ACÚSTICAS

Assim como os métodos acústicos, a propagação de ondas de tensão na madeira é influenciada pelas propriedades anatômicas (BUCUR, 1988), físicas e mecânicas deste material (WANG et al., 2001). Além destas propriedades, a propagação de ondas de tensão na madeira é influenciada pela direção de propagação e por defeitos presentes no material como degradação, nós, entre outros.

### 2.7.1 Direção de Propagação da Onda

Diferentes tipos de ondas podem se propagar pela estrutura da madeira como longitudinais, transversais e superficiais. Destas, as longitudinais se propagam mais rapidamente e são comumente usadas para avaliar as propriedades da madeira (WANG et al., 2001). GERHARDS (1981), verificou que as ondas de tensão emitidas no sentido transversal (perpendicularmente à direção da grã) não mantêm seu curso normal, aumentando seu tempo em um determinado percurso e reduzindo sua velocidade. McDONALD (1978) observou que a velocidade de ondas acústicas foi de 2 a 3 vezes mais rápida no sentido longitudinal do que radialmente ou tangencialmente e, BUCUR (1988) determinou velocidade 2,5 vezes menor no sentido radial e 3,5 vezes no sentido tangencial, quando comparados com o longitudinal.

### 2.7.2 Dimensões de Fibras e suas Relações

Segundo BUCUR (1988), avaliação das propriedades acústicas da madeira pode dar indicação da anisotropia deste material que está relacionada às variações nos elementos anatômicos.

As ondas acústicas se propagam através da massa ou substância madeira presente em maior quantidade na parede celular. Quanto maior a espessura celular, maior a área ou caminho contínuo para propagação das ondas que se dissipam rapidamente. Esta relação é mais acentuada se a emissão das ondas for realizada

no sentido longitudinal ou axial, direção de disposição das fibras. Em madeiras porosas, compostas por fibras com acentuados diâmetros de lume, os espaços vazios tornam-se barreiras para a propagação das ondas, reduzindo significativamente a velocidade e aumentando o tempo de propagação em um determinado percurso. Quanto às relações entre a largura das fibras e a propagação das ondas, em geral, as fibras que com maior diâmetro de lume são as mais largas e, conseqüente, se relacionam de forma negativa com a velocidade e positiva com o tempo de propagação de ondas de tensão.

No que diz respeito ao de comprimento de fibras, sua relação com o tempo e velocidade de propagação das ondas depende da direção de emissão. Se a mesma é realizada no sentido longitudinal, as ondas percorrem a parede da fibra, ao longo de seu comprimento, e ao final apresentam leve queda entre uma fibra e outra, quando então tomam a direção de percurso. Dessa forma, quanto maior o comprimento da fibra, maior o caminho contínuo da parede a ser percorrido, propiciando maior velocidade e menor tempo de propagação da onda (BUCUR, 1988). POELGE (1984) detectou forte correlação entre o comprimento de fibras e a velocidade das ondas acústicas, sendo determinado um coeficiente de correlação de 0,90. Porém, se a emissão das ondas se dá no sentido transversal às fibras, há a barreira do diâmetro do lume e as mesmas se desviam em cada fibra, percorrendo a parede até o final de seu comprimento para retomar o percurso na fibra seguinte. Com este desvio, há um aumento acentuado no tempo do percurso, reduzindo significativamente a velocidade de propagação das ondas. Além disso, no sentido transversal, as ondas cruzam a lignina existente entre a microfibrilas, que é mais amorfa e inelástica, podendo colaborar para reduções na velocidade das ondas (MATOS, 1997).

No que diz respeito às relações entre as dimensões das fibras com a propagação das ondas, em função da relação positiva da parede celular com a velocidade de propagação, o índice de Runkel e a fração parede também se correlacionam positivamente com a velocidade e negativamente com o tempo de propagação das ondas. O contrário ocorre com o coeficiente de flexibilidade que tem uma relação direta com o diâmetro do lume. A relação do índice de enfileiramento (quociente entre comprimento e largura das fibras) com a propagação das ondas também depende da direção da emissão das ondas.

### 2.7.3 Densidade Básica

As madeiras mais densas são as que apresentam maior teor de substância madeira, portanto menores espaços vazios, propiciando maior velocidade de propagação das ondas de tensão em um menor tempo para determinado percurso. As madeiras mais porosas, portanto, menos densas, apresentam menor velocidade de propagação das ondas.

KONARSKI; WAZNY (1977) observou que a velocidade de propagação de ondas acústicas foi reduzida em 25 % devido à perda de 16 % na densidade básica da madeira atacada por microorganismos. SCHAD (1995), determinando a qualidade da madeira de *Quercus rubra* para fins dimensionais, observou um aumento na velocidade de propagação das ondas de tensão com o aumento da densidade básica. BUCUR (1988) obteve uma significativa correlação ( $R^2 = 0,69$ ) entre a densidade da madeira e a velocidade das ondas, indicando que a variação na densidade tem uma correspondente variação na velocidade de propagação das ondas. Outras pesquisas também observaram aumentos na velocidade de propagação das ondas com aumentos na densidade da madeira (GERHARDS; 1978; JANG, 2000).

### 2.7.4 Percentual de Lenhos

A propagação das ondas também varia em função dos percentuais de lenho inicial e tardio. No lenho tardio, a velocidade das ondas de tensão é superior, quando comparado ao lenho inicial, pois é composto por fibras mais espessas, de menores diâmetros de lume, apresentando maior densidade básica. O lenho inicial, mais poroso devido às fibras com acentuados diâmetros de lume, apresenta relação negativa com a velocidade de propagação das ondas de tensão. YIANNOS; TAYLOR (1967) verificaram uma redução de 25 % na velocidade das ondas determinadas no lenho inicial, quando comparadas às do lenho tardio. Resultado semelhante foi observado por BURMESTER (1965), onde as ondas foram mais lentas em 10 % no lenho inicial. GERHARDS (1978) não detectou diferenças significativas da velocidade de propagação das ondas acústicas entre o lenho inicial e tardio.

### 2.7.5 Madeira Juvenil e Adulta

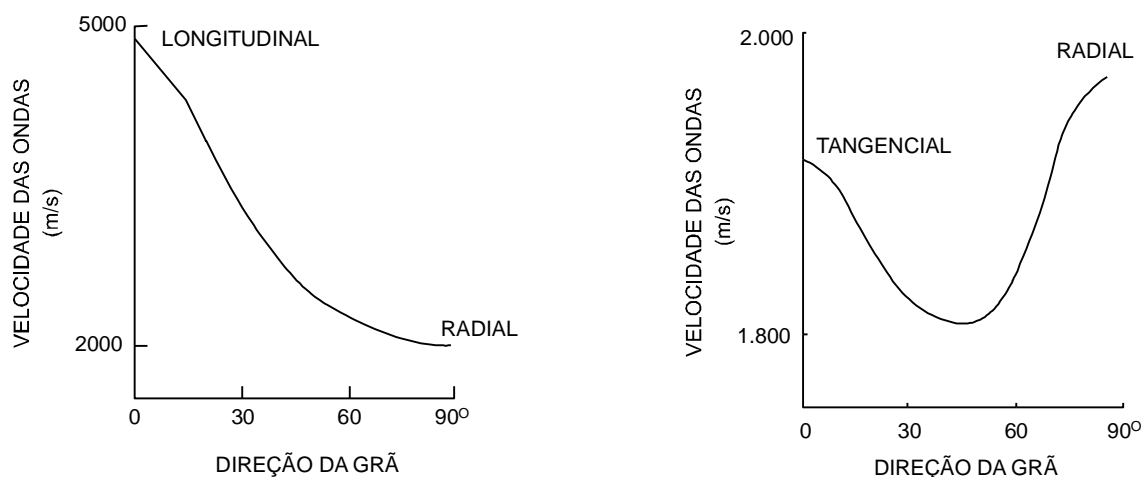
A propagação das ondas de tensão varia no sentido medula-casca. Essa variação se deve às diferenças anatômicas, físicas, morfológicas, entre outras. A madeira adulta, próxima à casca, apresenta maior percentual de lenho tardio, fibras mais espessas, menor diâmetro de lume e é mais densa, proporcionando maior velocidade das ondas de tensão. O contrário ocorre com a madeira juvenil, da região interna do tronco. BUCUR (1995) salientou que a velocidade das ondas é maior na madeira adulta, porém a maior ascensão é verificada na madeira juvenil. JANG (2000) estudando as propriedades de toras através de métodos não destrutivos, observou um aumento na velocidade das ondas do centro (madeira juvenil) para a parte externa da tora (madeira adulta). Segundo o autor esta variação se deve à maior densidade da madeira adulta.

### 2.7.6 Ângulo de Grã

Pesquisadores têm abordado o pronunciado efeito do ângulo de grã sobre a velocidade de propagação de ondas acústicas na madeira (LEE, 1958; ELVERY; NWOKOYE, 1970). A velocidade das ondas emitidas no sentido longitudinal decresce com o aumento no ângulo de grã. Se as fibras são posicionadas paralelas ao eixo longitudinal do tronco, portanto, com ângulo de grã próximo de  $0^\circ$ , as ondas longitudinais percorrem as fibras também longitudinalmente. Porém, quando as fibras formam ângulos com o eixo longitudinal do tronco, as ondas longitudinais cruzam as fibras e neste caso há influência negativa do diâmetro do lume, reduzindo a velocidade de propagação das mesmas. Quanto maior o ângulo entre a direção da onda e a direção da grã, menor é a velocidade e maior o tempo do percurso. Esta relação é ilustrada na Figura 8.

JUNG (1979), estudando as propriedades de lâminas de madeira, verificou que um ângulo de grã de  $5^\circ$  resulta numa velocidade 4 % menor que a obtida a  $0^\circ$ . Para um ângulo de  $10^\circ$  o autor observou um decréscimo de 19 % na velocidade das ondas. Resultados semelhantes também foram observados por outros pesquisadores, como McDONALD (1978), BUCUR (1995), e WANG et al. (2001).

FIGURA 8 - VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE ONDAS ACÚSTICAS EM FUNÇÃO DA DIREÇÃO DE GRÃ



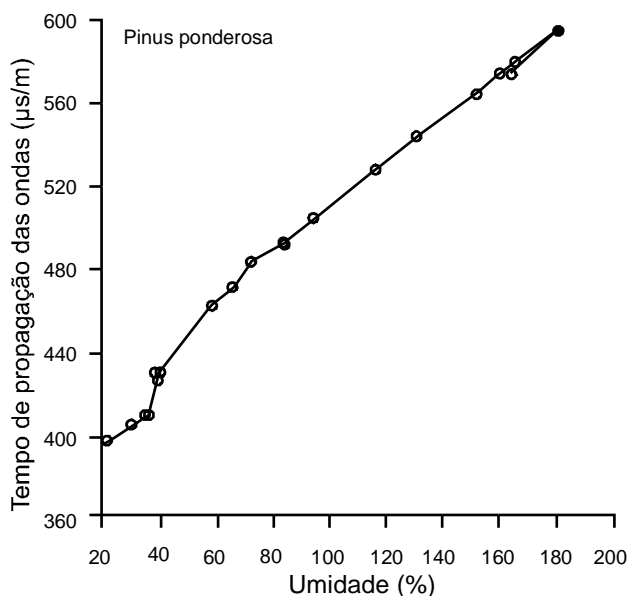
Fonte: McDONALD (1978)

### 2.7.7 Teor de Umidade

Outro fator que afeta a propagação de ondas de tensão é o teor de umidade do material avaliado. Quanto maior o teor de umidade, menor é a velocidade de propagação de ondas acústicas. JAMES (1961) avaliando os efeitos da umidade da madeira sobre a técnica de propagação de ondas acústicas, verificou um decréscimo na velocidade das ondas em função de aumentos na umidade. SIMPSON; WANG (2001) estudando a madeira de *Pinus ponderosa*, observaram decréscimo no tempo e, conseqüentemente, aumento na velocidade de propagação de ondas de tensão com decréscimos na umidade da madeira, durante o processo de secagem em estufa, conforme mostra a Figura 9. Mesmo resultado foi obtido por GERHARDS (1982b).

ROSS; PELLERIN (1991), estudaram a viabilidade de aplicação das ondas em material verde, com umidade acima do ponto de saturação das fibras para determinação do módulo de elasticidade. Os valores do módulo de elasticidade determinados no material verde mostraram-se correlacionados àqueles determinados no material com menor teor de umidade, indicando que a técnica de emissão de ondas de tensão pode ser aplicada em material verde.

FIGURA 9 - VARIAÇÃO DO TEMPO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA

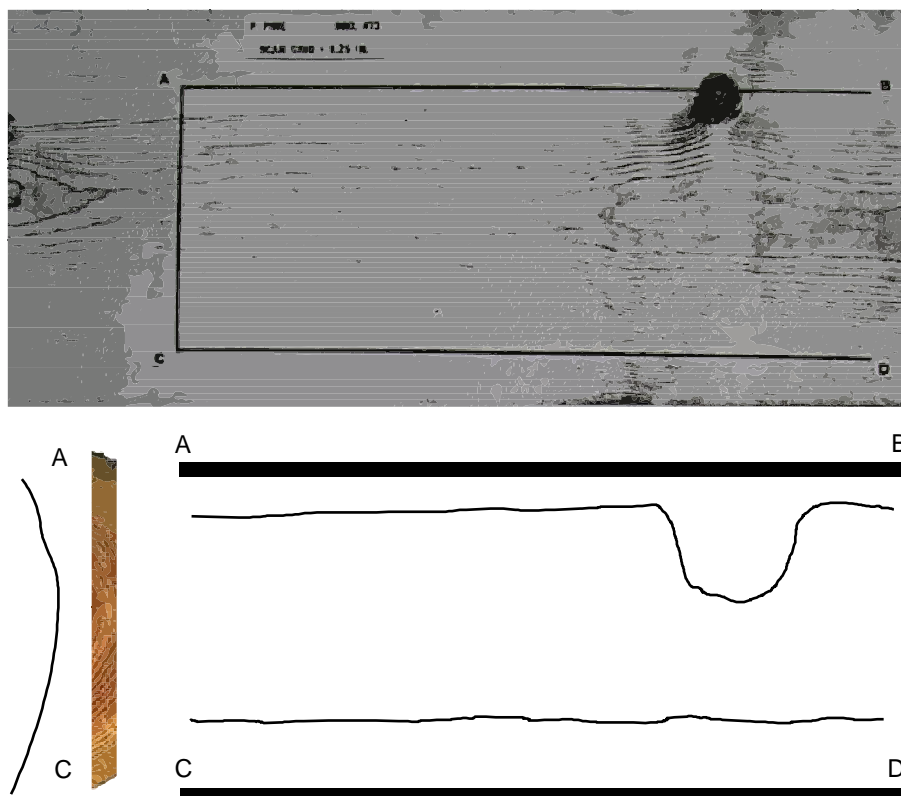


Fonte: SIMPSON; WANG (2001)

### 2.7.8 Nós

Os nós exercem grande influência na propagação de ondas acústicas. GERHARDS (1982a) demonstrou que as ondas de tensão induzidas por impacto na madeira com nó não mantêm seu curso normal, aumentando seu tempo de propagação. Segundo JUNG (1979), ao encontrar as áreas descontínuas dos nós, as ondas de tensão desviam seu curso, contornando-os através da madeira que os circunda, conforme ilustrado na Figura 10. Devido ao aumento no percurso há um aumento no tempo de propagação da onda, reduzindo a velocidade. Além disso, ao se propagar na madeira ao redor dos nós, os altos teores de extrativos e os altos ângulos de grã dessa região colaboram para uma redução ainda maior na velocidade das ondas. Segundo o autor, o tempo de propagação das ondas é mais sensível à área de nós quando comparado com seu diâmetro. Resultados similares foram verificados por BURMESTER (1965) e BETHGE; MATTECK (1994).

FIGURA 10 - ESQUEMA DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NA MADEIRA



A-B = curso das ondas em regiões com defeitos; C-D = curso das ondas em região sem defeitos; C-A = curso das ondas no sentido tangencial.

Fonte: Adaptado de McDONALD (1978)

Estas relações permitem localizar nas toras não só os nós, mas também outros defeitos, como a degradação por fungos (SCHAD et al., 1996) e sua influência nas resistências mecânicas (ROSS et al. 2003). Identificando-se os locais de degradação ou nós das toras, ou ainda os locais ocos é possível melhorar o aproveitamento e processamento da madeira (McDONALD, 1978).

## 2.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

A análise multivariada, técnica utilizada para avaliação dos dados neste trabalho, trata de mensurações do grau de associação, ou da correlação entre variáveis aleatórias. Variáveis aleatórias são aquelas que seguem as leis do acaso. A diferença entre a estatística univariada e a multivariada consiste na quantidade de variáveis que cada uma aborda simultaneamente. Enquanto a estatística univariada



trabalha com somente uma variável aleatória por vez, a multivariada trata de diversas variáveis aleatórias, ao mesmo tempo (JOHNSON; WICHERN, 1998; CLEMENTE, 1990).

Segundo JOHNSON; WICHERN (1998), a análise multivariada apresenta três objetivos principais: eliminar os ruídos presentes nos dados, isto é, excluir as variações devidas a erros não controlados; sumarizar os dados e revelar a estrutura dos mesmos. LUCHESA (2004), destaca como pontos positivos da estatística multivariada a capacidade de lidar com muitas variáveis aleatórias, simultaneamente; a capacidade de proporcionar informações que permanecem invisíveis nos dados originais e a aplicabilidade em muitos campos do conhecimento humano.

As técnicas de análises multivariadas são estatisticamente mais complexas, além de, muitas vezes, necessitarem de softwares específicos para o seu desenvolvimento, ou mesmo uma programação computacional. Por outro lado, os resultados gerados permitem que as interpretações mostrem-se mais coerentes à realidade do material experimental. O uso mais freqüente dessa técnica se deve à comprovada eficiência e eficácia, assim como o desenvolvimento de equipamentos eletrônicos mais capacitados para trabalhar com grande volume de dados (LAVORANTI, 2003).

São várias as técnicas estatísticas de análises multivariadas utilizadas na pesquisa científica, destacando-se a análise de componentes principais, análise fatorial, análise de correlações canônicas, análise discriminante e análise de agrupamentos. Nesta revisão foram abordadas apenas as duas primeiras técnicas, que foram utilizadas neste trabalho.

### 2.8.1 Análise de Componentes Principais

Análise de componentes principais é uma técnica estatística que transforma, linearmente, um conjunto de variáveis em outro conjunto com um número menor de variáveis não-correlacionadas, chamadas de componentes principais. Estas componentes explicam uma parcela substancial das informações do conjunto original, tornando-se um sistema mais simples para análise, podendo-se identificar relacionamentos que, em geral, não seriam possíveis com as coordenadas originais

das variáveis. Assim, a partir de um conjunto de dados com  $n$  variáveis, são obtidas  $n$  componentes principais. Segundo BARROSO; ARTES (2003), os principais objetivos da análise de componentes principais são:

- redução da dimensionalidade dos dados;
- obtenção de combinações interpretáveis das variáveis;
- descrição e entendimento da estrutura de correlação das variáveis.

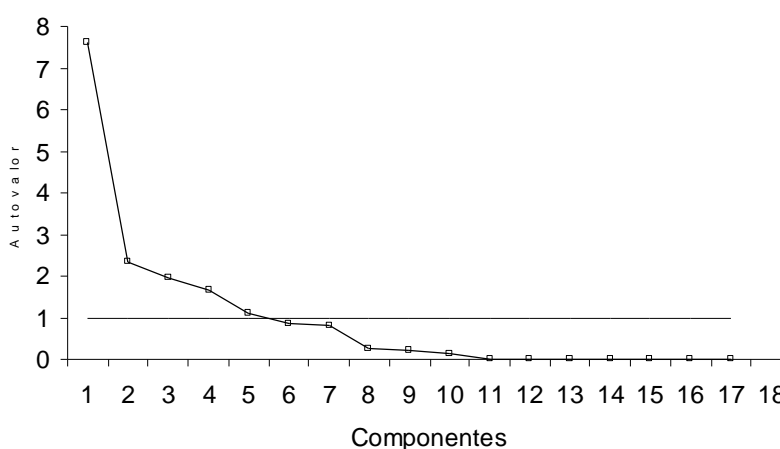
Algebricamente, as componentes principais são combinações lineares das variáveis originais. Geometricamente, são as coordenadas dos pontos amostrais em um sistema de eixos originais, na direção de variabilidade máxima dos dados. A análise depende somente da matriz de covariância ou da matriz de correlação das variáveis e não requer qualquer suposição sobre a forma da distribuição multivariada das mesmas.

A importância de cada componente principal é estabelecida em função da variância contida em cada uma delas, onde reside a sua capacidade de explicação da estrutura de variância/covariância. Assim, para que se possa estabelecer este ordenamento, ou ranqueamento das componentes é preciso analisar quanto cada uma delas explica a variação total do conjunto de dados. Segundo BARROSO; ARTES (2003), na literatura existem vários critérios que auxiliam na tomada de decisão com relação ao número de componentes principais a ser retida ou considerada na análise, tais como:

- Critério de Kaiser, que sugere manter na análise as componentes principais correspondentes aos autovalores maiores que a média dos autovalores, se a análise é baseada na matriz de covariância, ou as componentes principais correspondentes aos autovalores maiores que 1, se for usada a matriz de correlação;
- Reter o número de componentes principais que acumulem pelo menos certa porcentagem da variabilidade total dos dados (de preferência, acima de 70 %);
- Reter as componentes principais que acumulem pelo menos uma certa porcentagem da variabilidade de cada uma das variáveis originais (de preferência, acima de 50 %).

De acordo com BARROSO; ARTES (2003), uma ferramenta que pode auxiliar na escolha do número de componentes principais a reter é o “screen plot”, gráfico que representa os autovalores. Comumente, a diferença entre os primeiros autovalores é grande e diminui em direção aos últimos. Sugere-se o corte quando a variação passa a ser pequena. A Figura 11 ilustra o escalonamento dos autovalores da matriz de correlação, utilizado no capítulo 4 desta pesquisa.

FIGURA 11 - AUTOVALORES DAS COMPONENTES PRINCIPAIS OBTIDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS ÁRVORES EM PÉ



Fonte: o autor

A interpretação das componentes principais é feita com base nas correlações entre as variáveis originais e as componentes obtidas e nos coeficientes dados pelas combinações lineares que levam às componentes principais. As correlações são medidas das contribuições individuais de cada variável e não consideram a contribuição multivariada das demais variáveis e, os coeficientes são medidas das contribuições multivariadas. Como, em geral, se utiliza somente as primeiras componentes, a magnitude das demais determina se as primeiras se ajustam bem às observações. Quanto menor for a parte desprezada, melhor é o ajuste.

Muitas vezes, a análise estatística prossegue após a obtenção das componentes principais e técnicas que exigem a suposição de normalidade, por exemplo, podem ser empregadas. Gráficos do tipo “Q-Q plot” das primeiras componentes principais podem auxiliar neste sentido. Para tentar detectar observações com comportamentos diferenciados, pode-se recorrer a gráficos de

dispersão das últimas componentes principais (BARROSO; ARTES, 2003). Segundo LAVORANTI (2003), a representação gráfica “biplot” é uma técnica bastante útil na análise de componentes principais, pois o gráfico utilizado para representar simultaneamente as linhas e colunas de uma matriz de dados, pode indicar a existência de agrupamentos entre as observações, assim como mostrar as variâncias e correlações entre as variáveis.

## 2.8.2 Análise Fatorial

Análise fatorial é uma técnica estatística que descreve a estrutura de dependência de um conjunto de variáveis, através da criação de fatores, que são variáveis que, supostamente, medem aspectos comuns. Uma situação comum pode ser descrita como aquela na qual observa-se para cada elemento amostral, um grande número de variáveis. BARROSO; ARTES (2003) definem análise fatorial como “um conjunto de técnicas estatísticas, cujo objetivo é representar ou descrever um número de variáveis iniciais a partir de um menor número de variáveis hipotéticas”. Trata-se de uma técnica que, a partir da estrutura de dependência existente entre as variáveis de interesse (em geral representada pelas correlações ou covariâncias entre essas variáveis), permite a criação de um conjunto menor de variáveis (variáveis latentes ou fatores), obtidas a partir das originais. Além disso, a técnica possibilita saber o quanto cada fator está associado a cada variável e o quanto o conjunto de fatores explica da variabilidade total dos dados originais.

Os modelos de análise fatorial buscam explicar o comportamento das variáveis observadas em relação ao comportamento de um conjunto de variáveis não observadas (variáveis latentes ou fatores), podendo ser expresso por:

$$X_j = \sum_{r=1}^p a_{jr} f_r + e_j$$

em que,

$X_j$ : variáveis originais, existindo “m”  $x_j$

p : número pré-estabelecido de fatores

$a_{jr}$ : coeficiente que representa o carregamento da j’ésima variável sobre o r’ésimo fator

$f_r$ : r'ésimo fator

$e_j$ : variação casual única relativa das variáveis originais  $X_j$

As variáveis são expressas em termos de vetores num sistema de coordenadas ortogonais, em que o comprimento representa a magnitude, agrupam-se conforme o relacionamento entre si. Por esses agrupamentos de vetores passam-se eixos, denominados fatores, que acusam, pelo valor da projeção dos vetores sobre os eixos, a carga fatorial das variáveis sobre si. Esses fatores representam o número mínimo de causas que condicionam um máximo de variabilidade existente. A comunalidade (representada por  $h^2$ ), isto é, a soma dos quadrados das cargas fatoriais das variáveis sobre cada fator indica a eficiência dos mesmos na explicação da variabilidade total (LUCHESA, 2004).

Os fatores são encontrados fazendo-se com que o primeiro eixo esteja em tal posição que a soma dos quadrados dos pesos fatoriais, em relação a ele, seja maximizada, o que equivale a colocá-lo paralelamente ao principal agrupamento de vetores. O segundo eixo é colocado ortogonalmente, de modo que a soma de quadrados dos pesos fatoriais para este segundo eixo também seja maximizada, e assim por diante em relação aos demais fatores.

Uma das dificuldades resultantes deste procedimento é que o padrão de carregamento para cada componente pode não fornecer dimensões facilmente interpretáveis. Por exemplo, em uma matriz de coeficientes de correlação em que nenhum deles é particularmente alto, o padrão de carregamento que pode ocorrer com respeito ao primeiro fator pode ser da mesma ordem relativa de magnitude que o existente em relação ao segundo fator, ao terceiro fator, etc. Há necessidade, então, de uma rotação dos eixos fatoriais. A finalidade dessa rotação é a maximização, colocando os eixos fatoriais numa única posição tal que cada fator possa ser interpretado pelos maiores carregamentos possíveis, relacionados com o menor número de variáveis possível (BARROSO; ARTES, 2003).

Há vários métodos para a obtenção dos fatores, entretanto os mais utilizados são o das componentes principais e o da máxima verossimilhança. Quando se está interessado no relacionamento entre variáveis, é comum se utilizar a obtenção dos fatores através do método das componentes principais e o cálculo dos autovalores e autovetores é feito a partir de uma matriz padronizada de variância-

covariância, isto é, uma matriz de coeficientes de correlação entre “p” variáveis, tendo todas o mesmo peso.

Os autovalores e, conseqüentemente, os fatores representam a proporção da variância total explicada pelo respectivo autovetor e cada fatorial e cada carga fatorial é proporcional à raiz quadrada da quantia de variância atribuída pela respectiva variável ao vetor.

As comunalidades ( $h_j^2$ ) indicam quanto da variabilidade total está sendo explicada pelo conjunto de fatores. Portanto, é a parcela da variância de uma determinada variável  $X_i$ , dada por uma equação, explicada pelos fatores comuns. As comunalidades podem assumir valores entre +1 e -1, quanto mais próximas a 1, melhor é o ajuste do modelo. A parcela da variância não explicada é denominada especificidade. Variáveis com baixa comunalidade devem ser excluídas da análise (BARROSO; ARTES, 2003).

Para que os “p” fatores ortogonais situados no espaço “m” dimensional sejam mais facilmente entendidos é necessário que estejam em tal posição, de modo que as projeções de cada variável sobre o eixo fatorial, situem-se o melhor possível, seja junto à extremidade, seja junto à origem. Em outras palavras, haverá necessidade de um critério de maximização da variância dos carregamentos sobre os fatores, o que é conseguido pela rotação dos eixos fatoriais. Existindo diversos algoritmos à disposição, o mais comum é o critério “Varimax”. Esse método minimiza o número de variáveis, com altas cargas sobre o fator, reforçando a interpretação dos mesmos (HAIR et al., 1998).

Depois de encontrada a matriz fatorial rotacionada, o passo seguinte é a escolha do número de fatores que é uma das tarefas mais importantes de uma análise fatorial. HAIR et al. (1998) menciona que, se o pesquisador opta por um número reduzido de fatores, poderá não identificar estruturas importantes existentes nos dados. Por outro lado, se o número é excessivo, poderá vir a ter problemas de interpretação dos fatores.