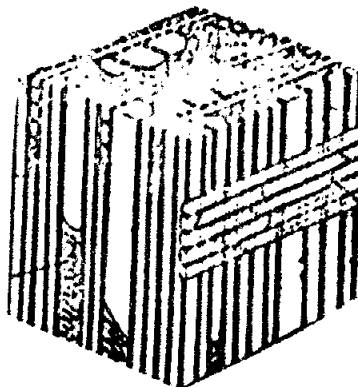
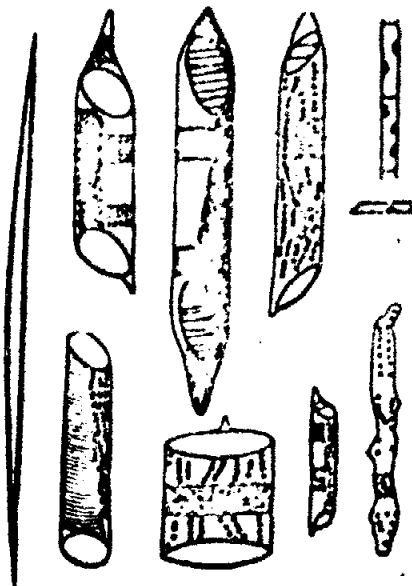




CENIBRA



ESTRUTURA DA MADEIRA



Celso E. Bochetti Foelkel

Belo Oriente, MG

Janeiro, 1977

ESTRUTURA DA MADEIRA

1. GENERALIDADES

Quando se observa uma folha de papel, principalmente dos tipos especiais, bem acabados, com boa formação e de superfície calandrada, pode-se ter a impressão que o mesmo é constituído de um material homogêneo.

Entretanto quando rasgamos esta folha de papel e observamos a linha do rasgo, notamos arranjas irregularmente inúmeras estruturas filamentosas de tamanho diminuto. Estas estruturas, que existem em número assombroso numa folha de papel (1 a 10 milhões/grama de papel), são chamadas de fibras pelos técnicos em celulose e papel (Vide figura 1).

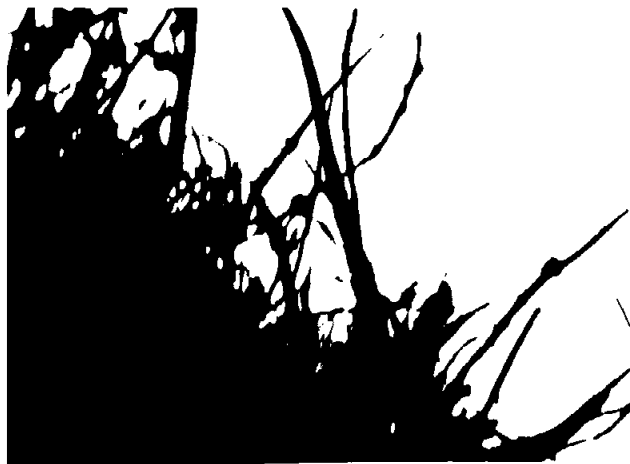


Figura 1 : Região de rasgo de uma folha de papel

Se por outro lado, examinarmos a superfície da mesma folha de papel, com o auxílio de um microscópio, notamos que estas fibras se entrelaçam umas às outras formando uma rede, onde podem aparecer outros tipos de estruturas (p.e. vasos, parênquima, etc). A figura 2 nos mostra um papel de baixa espessura feito com uma mistura de celuloses de fibras longas e curtas.

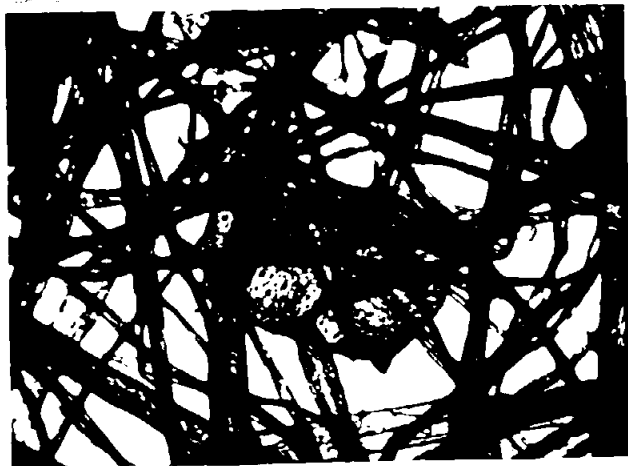


Figura 2 : Superfície de um papel composto de fibras longas e curtas.

Em quase 95 % dos casos o papel é fabricado com fibras que provem da madeira. Por processos especiais a madeira tem seus constituintes anatômicos individualizados e estes dão origem ao que se chama de celulose, massa, polpa ou pasta. Estas fibras da celulose, também em máquinas especiais, recebem tratamentos diversos para aumentar a resistência e a flexibilidade e são novamente reunidas na forma de uma folha de papel.

Sendo a madeira a principal matéria-prima que fornece fibras para a fabricação da celulose e como a qualidade da celulose e papel dependem sobremaneira da qualidade da madeira, é natural que procuremos conhecer a mesma em seus detalhes.

No estudo da qualidade da madeira para produção de celulose e papel os seguintes itens devem merecer atenção:

- anatomia da madeira e morfologia da fibra;
- composição química da madeira;
- variabilidade da madeira;
- madeiras anormais;
- influência das práticas florestais na qualidade da madeira;
- melhoramento genético da qualidade da madeira;
- inter-relação entre qualidade da madeira e qualidade da celulose.

Desde que conheçamos bem a madeira e a forma de melhorar sua qualidade através genética florestal ou através de técnicas florestais, podemos produzir madeiras com qualidades específicas para certos tipos de celulose ou papel.

2. CLASSIFICAÇÃO VEGETAL DAS PLANTAS PRODUTORAS DE MADEIRA

A maioria dos vegetais existentes na Natureza não produzem madeira. Entretanto, alguns, mesmo não produzindo madeira, são fibrosos e podem ser utilizados para fabricação de celulose. É o caso por exemplo da cana-de-açúcar, que

fornece o bagaço, material de grande uso e potencial para celulose; do tronco do babaçu; das folhas do sisal, fórmio, carnaúba, abacaxi, etc.

A madeira é porém o mais importante material para produção de celulose. Entretanto esta não era a situação há pouco mais de um século atrás.

Conforme se sabe, o papel foi inventado pelos chineses há aproximadamente dois mil anos. A utilização de materiais fibrosos vegetais, desintegrados por processos mecânicos ou químicos, é um dos princípios básicos e imutáveis da indústria de celulose. Com a evolução das técnicas de fabricação houve uma necessidade cada vez maior de se procurar novas matérias-primas que fornecessem fibras em abundância e a baixo custo.

Os primeiros fabricantes de papel recorriam às cascas de certas árvores e arbustos e a plantas têxteis tais como linho, cânhamo, juta, etc. Dentre as cascas de espécies arbóreas e arbustivas, tinha-se especial preferência pelas de Brossonetia sp (Moraceae) e Edgeworthia papyrifera (Thymelaceae). Estes materiais eram geralmente de fácil desintegração e individualização das fibras. O processo primitivo de desintegração manual foi aos poucos sendo substituído por moinhos mecânicos tipo pilão. Este progresso foi que possibilitou a utilização de trapos, em que as fibras torcidas pelo processo de fiação, eram separadas mecanicamente. Com o incremento do uso dos trapos, que foi a matéria-prima mais popular por inúmeros séculos, e com a consequente escassez e encarecimento do mesmo, a crise da matéria-prima começou a preocupar os fabricantes.

A descoberta em 1670 do moinho tipo holandesa, devido as características do mesmo de fazer um trabalho mais enérgico e de maior produtividade, colaboraram para a queda do preço e um maior consumo de papel.

A partir do início do século XVIII a crise de matéria-prima atingiu seu ponto culminante. Nesta fase da indústria, houveram inúmeras tentativas para se encontrar novos materiais capazes de substituir o trapo, julgado insuficiente para as necessidades da indústria e a um preço incompatível ao valor do papel. Nesta época apareceram os primeiros trabalhos que procuraram usar palhas de cereais e de esparto para fabricação de papéis de resistências razoáveis. As palhas tiveram boa aceitação durante algum tempo, porém as dificuldades em coleta e manuseio impediam o desenvolvimento de grandes indústrias.

Na primeira metade do século XIX, para atender a um consumidor cada vez mais exigente e para conviver com a falta de matéria-prima, os fabricantes de papel passaram a compor papéis de misturas de trapos e palhas, cascas, etc.

A situação continuou a se agravar e situações como a apresentada na figura 3, onde se oferecem recompensas para quem encontrar outras matérias-primas passaram a ser frequentes.

1000 POUNDS REWARD.

The Proprietors of a leading Metropolitan Journal OFFER the above
REWARD to any person who shall first succeed in

INVENTING OR DISCOVERING
the means of using a

CHEAP SUBSTITUTE
FOR THE

COTTON & LINEN MATERIALS

NOW USED BY

PAPER-MAKERS,

Subject to the following conditions:

1. The material must be practically unlimited in quantity, and be capable of being converted into pulp of a quality equal to that which is at present used in manufacturing the best description of newspaper, and at a cost, ceteris paribus, not less than ten per cent. lower.

2. It must be tested, approved, and adopted by three eminent manufacturers of paper (two of them to be named by the advertiser), whose certificate shall entitle the inventor to the payment of the reward.

3. This offer will be in force only for a period of 12 months from the 26th of May, 1854.

Apply by Letter to A. H. Messrs. SMITH & SONS, 136, STRAND.

Figura 3 : Aviso oferecendo recompensa para descoberta de ma-
térias-primas fibrosas

A história relata como o ano de 1844 quando o primeiro processo para fabricação de pasta mecânica de madeira foi inventado por Keller (Alemanha). Celulose química foi obtida em 1851 por Hugh Burgess (Inglaterra) através do processo soda, porém o processo só foi aceito ano mais tarde, já que a qualidade da celulose obtida não era satisfatória.

Com o desenvolvimento dos processos químicos sulfito e kraft a madeira se firmou como a mais importante fonte de fibras para a indústria de celulose. Hoje, não existem dúvidas que ela persistirá por muito tempo ainda, pois é um recurso fácil e economicamente renovável. Por outro lado, as tentativas de se fazer papel sintético até o momento não foram bem sucedidas.

Dentro do reino vegetal a madeira é produzida pelos vegetais superiores da divisão Espermatofitae (plantas com sementes), das sub-divisões Gymnospermae (coníferas, madeiras moles, madeiras de fibras longas ou madeiras resinosas) e Angiospermae (folhosas, folhudos, latifólias, madeiras duras ou madeiras de fibras curtas). Dentre as angiospermas, apenas os vegetais da classe das dicotiledôneas produzem madeira.

As árvores e as madeiras desses tipos de vegetais são facilmente distinguíveis por apresentarem características próprias, como será discutido posteriormente.

No Brasil as principais coníferas e folhosas utilizadas para produção de celulose são:

Coníferas : Pinus elliotti
Pinus taeda

Araucaria angustifolia

Pinus caribaea

Folhosas: Eucalyptus saligna

Eucalyptus grandis

Eucalyptus urophylla

Acacia mollissima

3. FORMAÇÃO DA MADEIRA

3.1 Partes das árvores

É nas folhas das árvores que de uma forma indireta, se inicia a formação da madeira. Como se sabe, as folhas de quaisquer dos vegetais clorofilados realizam uma importante função que é a fotossíntese. Através da fotossíntese as folhas retiram o gás carbônico do ar e com a água absorvida pelas raízes acumulam a energia solar em energia química, na forma de carboidratos. Estes carboidratos, formados nas folhas, são deslocados para as regiões em crescimento da árvore e são transformados em novos tecidos.

Morfologicamente uma árvore é formada de raiz, tronco e copa. Na copa encontram-se ramos, folhas, flores, frutos e sementes. Atualmente quase que exclusivamente a madeira do tronco ou caule é transformada em celulose. Entretanto existe hoje um movimento muito grande para a utilização integral da árvore para celulose.

As raízes ou sistema radicular absorvem a água e sais minerais do solo ao mesmo tempo que apoiam o vege

tal ao terreno. O tronco é a parte de maior valor comercial da árvore e tem a função de sustentação e de condução de seiva na árvore viva.

Na copa é onde se formam os carboidratos por fotossíntese, pois aí se localizam as folhas. É na copa também que surgem os órgãos reprodutivos das árvores (flores, frutos e sementes).

É possível a separação de coníferas e folhosas pela morfologia externa das árvores. As coníferas possuem folhas em forma de agulhas (acículas) e não possuem frutos, enquanto as folhosas possuem folhas em forma de lâminas e as suas sementes são formadas no interior de frutos.

Numa seção transversal do tronco observam-se as seguintes partes: casca, xilema e medula

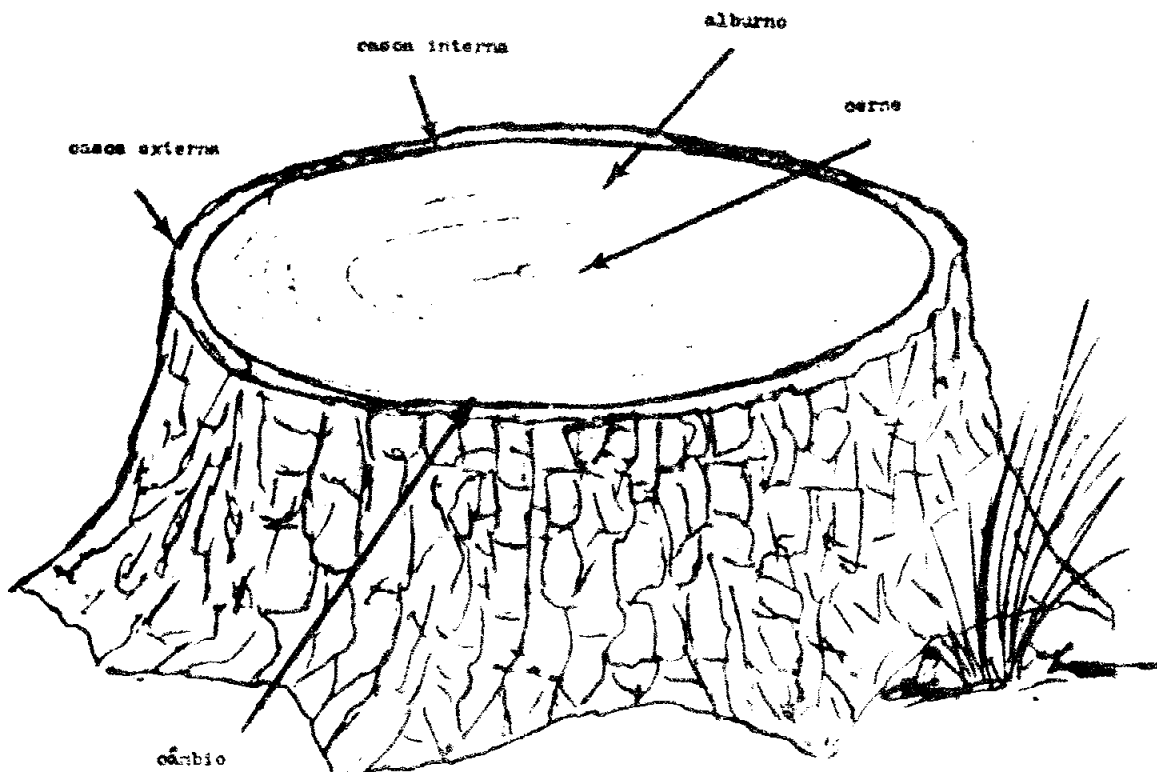


Figura 4 : Seção transversal do tronco

A casca é um tecido com pouco material fibroso e que possui duas funções: proteção contra agentes externos e condução da seiva elaborada no sentido descendente, das folhas para a alimentação das raízes. Da mesma forma, observam-se dois tipos de casca no vegetal: casca interna ou floema, tecido condutor da seiva e casca externa ou córtex, tecido protetor.

O xilema é a denominação botânica para a madeira propriamente dita. Ele é normalmente constituído de duas partes: xilema ativo ou alburno, que é xilema ainda com a função de conduzir seiva bruta das raízes para as folhas; e, xilema inativo ou cerne, que é o xilema já sem função condutora, que teve suas células impregnadas com extrativos, para se tornar mais resistente e sustentar a copa.

A medula é um tecido primário, originado no crescimento em altura da árvore e que pode ser notado na parte central do caule ou, às vezes, das raízes.

3.2 Formação do tronco

No crescimento da árvore para formação do tronco notam-se dois tipos de processos: o crescimento em altura e o crescimento em diâmetro.

O crescimento em altura se deve à atividade do meristema apical do caule, localizado nas gemas terminais ou brotos. Os meristemas apicais mantem-se ativos durante toda a vida da árvore. Eles se constituem em grupos de células que possuem atividade embrionária. Da multiplicação destas células originam-se a medula, o procâmbio e o dermatogêneo.

A medula é o tecido que fica ao centro, sendo encontrada em toda a extensão do caule com as mesmas características e dimensões observadas na sua formação. Continua a ser um tecido meristemático, pois não se evolue, porém sem capacidade de divisão. O procâmbio que se formou ao lado da medula transforma-se na parte externa em floema primário e para o interior em xilema primário. Entretanto a parte central do procâmbio conserva-se como um meristema, mantendo a capacidade de se dividir; é o câmbio, que é um tecido meristemático secundário.

O crescimento em diâmetro se deve à ação de dois meristemas secundários: câmbio e felogêneo. Pela ação do câmbio em divisão forma-se o xilema secundário para o interior e o floema secundário para fora. Como o xilema e a casca interna crescem em diâmetro, a casca externa precisa acompanhar este desenvolvimento, enquanto ainda viva. O crescimento da casca externa se faz por ação do felogêneo.

A partir do dermatogêneo, que é uma camada unicelular, origina-se a epiderme, cuja função é proteger o caule jovem. Na época de formação da epiderme surge o endoderme que protege a região vascular em formação.

Importante consideração a ser levantada é que todos os constituintes da madeira originam do câmbio. Assim, células extremamente diferentes como as fibras, elementos de vasos e células parênquimatosas provêm do câmbio. Isso acontece porque no câmbio ocorrem dois tipos de células iniciais: fusiformes iniciais e iniciais do raio. As primeiras, que dão origem a fibras, vasos e parênquima longitudinal, tem formato alongado, enquanto as segundas, que darão origem ao parênquima radial, são arredondadas.

Devido ao ordenamento na formação destas células iniciais é que a madeira apresenta-se com uma orientação ordenada de suas células.

Estas células iniciais se dividem em duas, uma se diferencia em célula adulta de floema ou xilema ou raio e a outra mantém o caráter embrionário.

Poder-se-ia supor que o floema e xilema devam ter a mesma espessura pois são originários da mesma célula. Entretanto isso não ocorre, sendo a espessura do xilema bastante superior ao floema. As razões para isso são: as células cambiais iniciais produzem maior número de células de xilema; o floema perde sua vitalidade após pouco mais que um ano e desloca-se para o exterior sendo comprimido radicalmente e, as vezes, vem a formar parte da casca que é descamada.

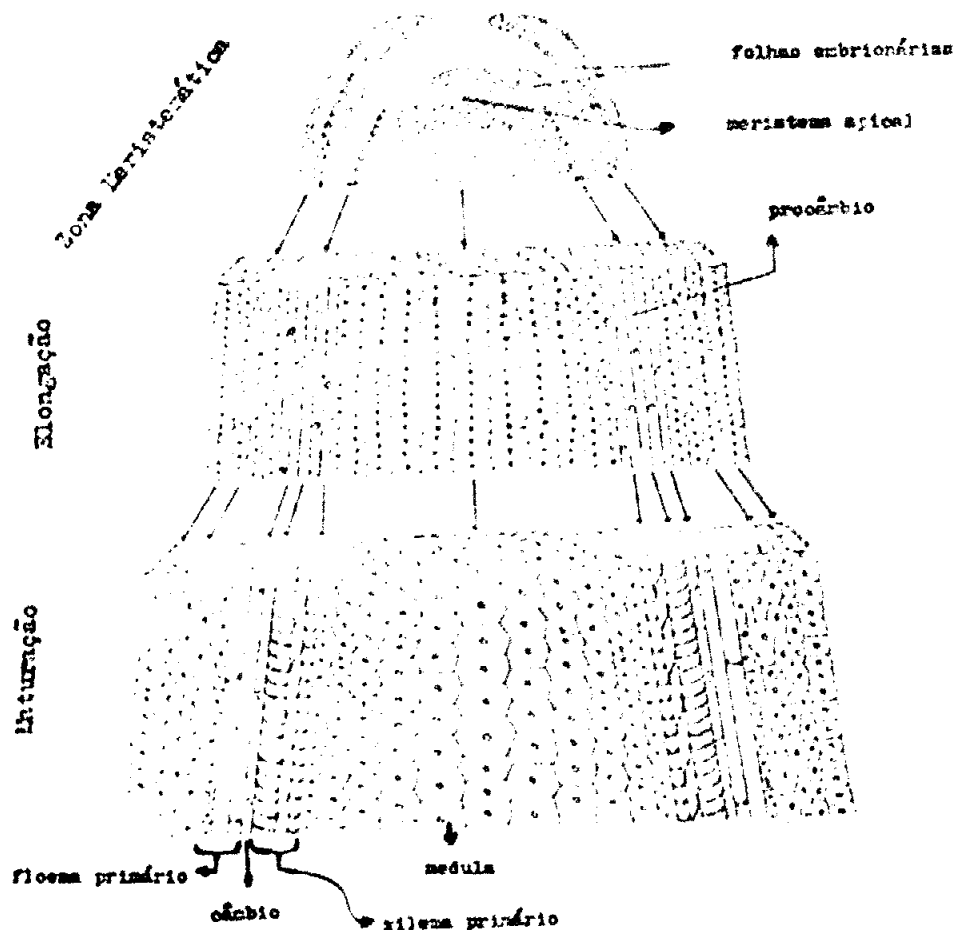


Figura 5 : Região apical do tronco

3.3 Anéis de crescimento

Em regiões de estações definidas, as árvores apresentam rápido crescimento na estação favorável e este ritmo de desenvolvimento pode diminuir ou cessar na estação desfavorável. Isso ocasiona uma atividade diferencial de câmbio, dando origem a camadas anuais de crescimento, bem definidas. Um anel de crescimento é a camada de madeira formada ao redor do caule no período de um ano. Na seção transversal da madeira os anéis são facilmente observados, principalmente para as coníferas.

Em uma árvore de crescimento normal os anéis de crescimento formam cones concêntricos na seção longitudinal. O ápice dos cones indica onde a extremidade do meristema apical se encontrava a diferentes idades.

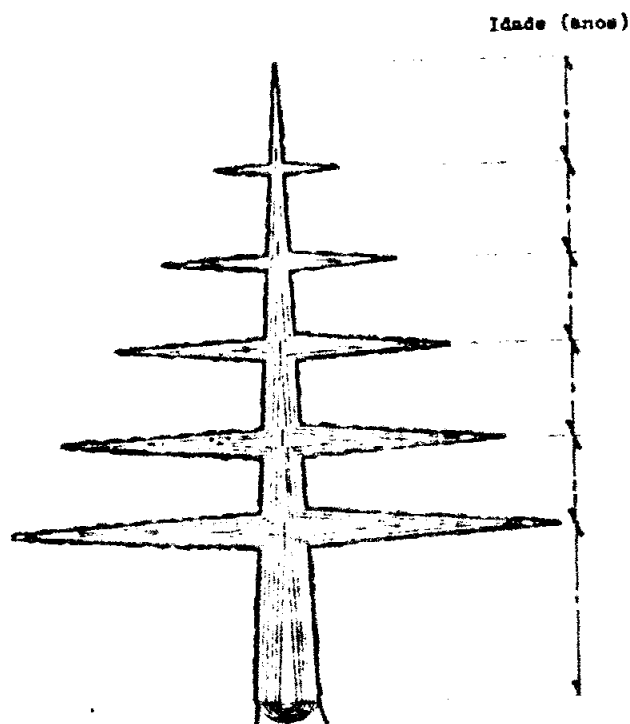


Figura 6 : Representação dos anéis de crescimento na seção longitudinal de uma árvore

A madeira formada na estação favorável mostra características completamente distintas da madeira formada na estação desfavorável. Não há necessidade que a condição desfavorável seja apenas a falta de calor. A falta de qualquer fator de desenvolvimento (calor, água, nutrientes) ocasiona uma modificação no funcionamento do câmbio e outro tipo de madeira se forma.

A madeira da estação favorável recebe a denominação de lenho inicial, enquanto a formada no período desfavorável, de lenho tardio. A relação entre estes dois tipos de lenhos é fundamental para a determinação da qualidade da celulose, especialmente para coníferas.

O lenho inicial mostra células de parede delgada, de maior diâmetro, enquanto as células do lenho tardio são mais longas, estreitas e de paredes espessas.

Um anel de crescimento é constituído dos lenhos inicial e tardio formados no período de um ano. Desta forma é possível estimar-se a idade da árvore contando-se o número de anéis de crescimento de um disco tomado na base da mesma. Esta prática porém não é precisa, pois às vezes ocorrem condições desfavoráveis numa estação favorável, ou vice-versa, e formam-se os chamados falsos anéis de crescimento.

3.4 Cerne e alburno

Freqüentemente a zona mais interna do caule , o cerne, pode ser distinguido da zona mais externa, alburno. O cerne é normalmente mais escuro que o alburno em razão de infiltração de extrativos como resinas, taninos, etc. Todas as células desta região são mortas e têm apenas função de suporte. Os vasos do cerne das folhosas são normalmente obstruídos por invaginações citoplasmáticas das células vizinhas de parênquima, formando o que se chama de tiloses.

O alburno é mais claro que o cerne, embora normalmente a transição entre ambos seja gradual e não abrupta. A largura do alburno é variável de um a muitos anéis de crescimento. Esta é a região de transporte de seiva bruta da árvore. Deve-se salientar que vasos e outros elementos condutores do alburno são células mortas, mesmo que o alburno seja dito vivo ou ativo. Apenas as células de parênquima que armazenam substâncias de reserva, são células vivas. Mesmo mortos, estes elementos condutores formam um sistema capilar e a seiva flui por ele em razão principalmente do fluxo de massa determinado pela transpiração das folhas.

4. SEÇÕES DE ESTUDO DAS MADEIRAS

Para o estudo da madeira torna-se necessário considerar três seções segundo planos ortogonais: transversal, normal ao eixo e correspondente ao topo das toras; longitudinal radial, que corresponde a um plano de corte passando pelo eixo, e, longitudinal tangencial, que resulta de cortes paralelos ao eixo do tronco e tangenciais às camadas de crescimento.

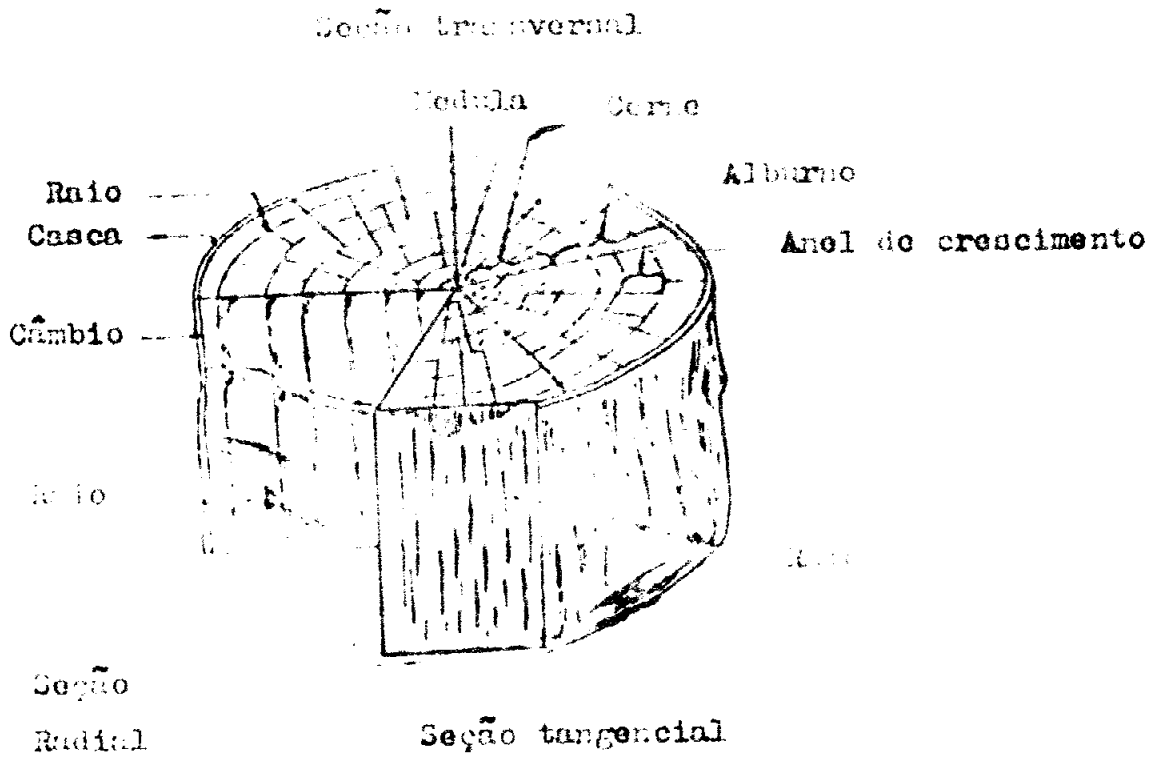


Figura 7 : Esquema de um disco do tronco mostrando caracte -
rísticas macroscópicas.

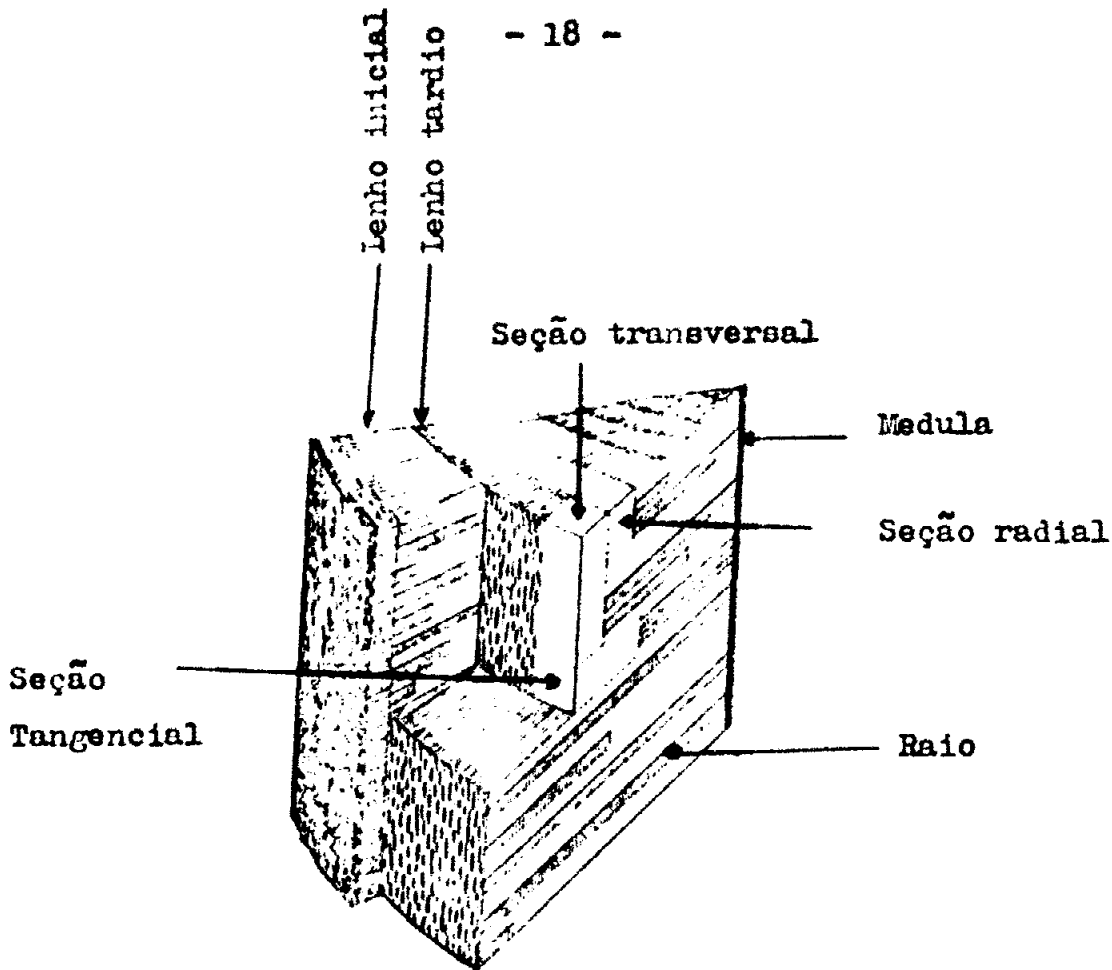


Figura 8 : Seções de estudo da madeira

Macroscopicamente, o aspecto nos dois planos' de corte longitudinais é pouco diferenciado. O corte transversal apresenta por outro lado características bem distintas dos outros dois. Na seção transversal os anéis de crescimento tomam a forma de anéis concêntricos.

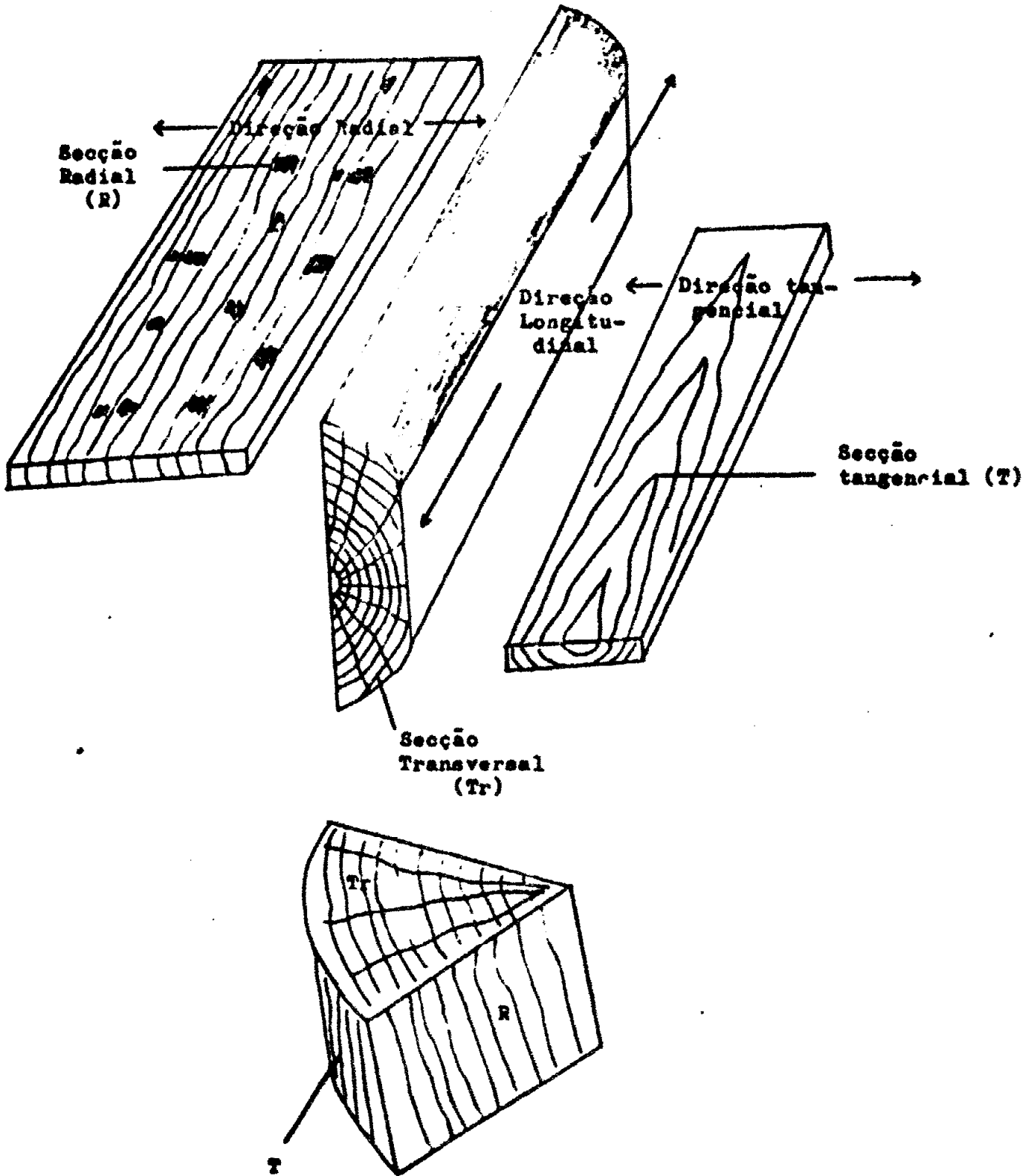


Figura 9 : Representação das três seções e direções do caule

5. A FIBRA LENHOSA

5.1 Formação da parede celular

Após divisão das células cambiais, as novas células que se transformarão em células de xilema devem-se diferenciar em fibras, vasos, raios, etc. Para isto faz-se necessário que elas tenham suas dimensões aumentadas. O crescimento das células se faz em diâmetro e comprimento, a seguir há o espessamento da parede celular que é acompanhado e seguido por lignificação da parede celular.

Logo após a divisão das células cambiais, as células originárias são vivas, contendo apenas uma parede primária com um protoplasma vivo. Como é característico da maioria dos vegetais, também para as células das árvores ocorrem ligações entre os protoplasmas de células adjacentes, formando cordões citoplasmáticos chamados plasmodesmas. Nesta fase, as paredes primárias são bastante finas, a tal ponto de ser difícil a distinção das paredes de duas células adjacentes e da lamela média, que é a lâmina de ligação entre duas células. Por este motivo, estas três estruturas juntas compõem a lamela média composta, que é notada como uma única lâmina ao microscópio ótico.

No início do processo de diferenciação das células lenhosas, pouco material rígido como a lignina, existe presente na parede primária. A ligação de uma célula à outra é devida a substâncias pécticas, dentre outros compostos. As células são extremamente flexíveis e plásticas em razão das paredes delgadas.. Isso permite um crescimento normal, sem restrições, das células recém produzidas.

O início da diferenciação consiste no cresci-

mento da célula em diâmetro e em comprimento. O aumento em diâmetro ocorre primeiro, e, chega a ser tão drástico, que certas células tem seu diâmetro aumentado dez vezes ou mais. O crescimento em diâmetro é bem mais acentuado entre os traqueídeos que para as fibras libriformes. A fase seguinte do crescimento é o alongamento das células, que é também mais pronunciado para os traqueídeos de coníferas, chegando a valores equivalentes a trinta vezes o comprimento inicial das células.

Estes dois tipos de crescimento, em diâmetro e comprimento, só pode ser realizado com o aumento da superfície das paredes primárias das células. Para que este aumento superficial ocorra, o protoplasma introduz novas microfibrilas celulósicas e outros materiais entre as microfibrilas celulósicas já existentes na membrana. Este tipo de crescimento é denominado intuscepção. Assim a parede primária da célula adulta é formada por intuscepção.

A seguir, passa a ocorrer o espessamento da parede por adição de material celulósico sobre a superfície da célula. Este tipo de crescimento é chamado aposição.

Na primeira fase do crescimento, durante a intuscepção, a parede secundária ainda não se formou, e somente a primária se expande. Pode-se admitir que nesta fase a parede primária ocorre como uma rede frouxa de microfibrilas, onde novas microfibrilas vão sendo introduzidas.

Por aposição a parede celular é espessada, dando-se origem à parede secundária. A deposição de microfibrilas por ação protoplasmática se faz ordenadamente e as camadas formadas mantem uma orientação definida e característica das mesmas.

Nesta fase já começa a ocorrer a formação da lignina que passa a embeber todas as microfibrilas, dando origem a uma matrix envolvente, juntamente com outras substâncias, como as hemiceluloses.

Após o espessamento e lignificação da parede secundária não ocorrem novos crescimentos pois as células tornam-se rígidas. Com a intensificação da lignificação, as células prosenquimatosas morrem e o protoplasma morre e se incrusta na forma de debris ou verrugas na parede secundária. As células parenquimatosas também morrem, embora permaneçam mais tempo ativas.

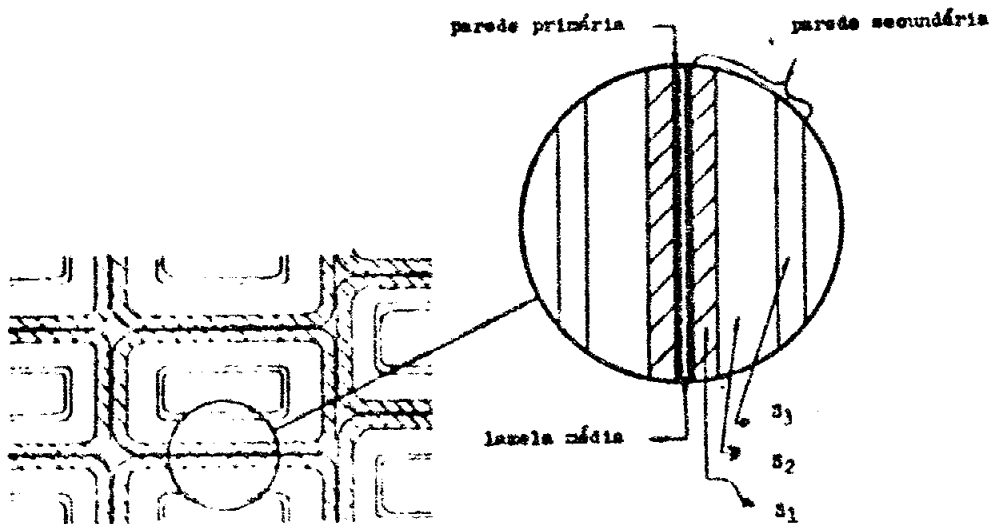


Figura 10 : Representação da seção transversal da fibra lenhosa

5.2 Modificações da parede celular

Durante a formação da parede celular, principalmente durante o espessamento da parede secundária, algumas áreas ficam sem receber este espessamento, aparecendo na fibra adulta como aberturas denominadas pontuações.

Uma pontuação é definida como um recesso na parede secundária da fibra, aberta para o lúmen na parte interna e tendo a fechá-la na parte externa a parede primária. Formam-se a partir dos plasmodemas existentes nas paredes primárias das células em desenvolvimento. Nas regiões onde ocorrem os plasmodemas, chamadas de campos de pontuações, a parede primária e a lamela média formam uma rede mais aberta que o normal, sendo que elas se apresentam mais finas em certos locais. Nestes locais não ocorre o espessamento da parede e as microfibrilas da parede secundária ao lado da pontuação circundam-na como um líquido que flui ao redor de um obstáculo.

Em geral as pontuações se formam aos pares, em cada uma de células adjacentes. Ao conjunto destes pares correspondentes de pontuações denomina-se de par de pontuações. A membrana que separa as duas cavidades das pontuações é formada pela lamela média e pelas duas paredes primárias, uma de cada célula.

De acordo com a forma que o par de pontuações apresenta ele é classificado como:

- a. par de pontuações aureoladas: lembram uma auréola. São típicos de elementos condutores como traqueídeos, vasos e fibrotraqueídeos.
- b. par de pontuações simples: são simples perfurações circula-

res na parede. Ocorrem principalmente nas células parênquimatosas.

- c. par de pontuações semi-aureoladas : representam o pareamento de uma pontuação simples com uma pontuação aureolada. Aparecem nas regiões de contato entre células de parênquima e células condutoras.

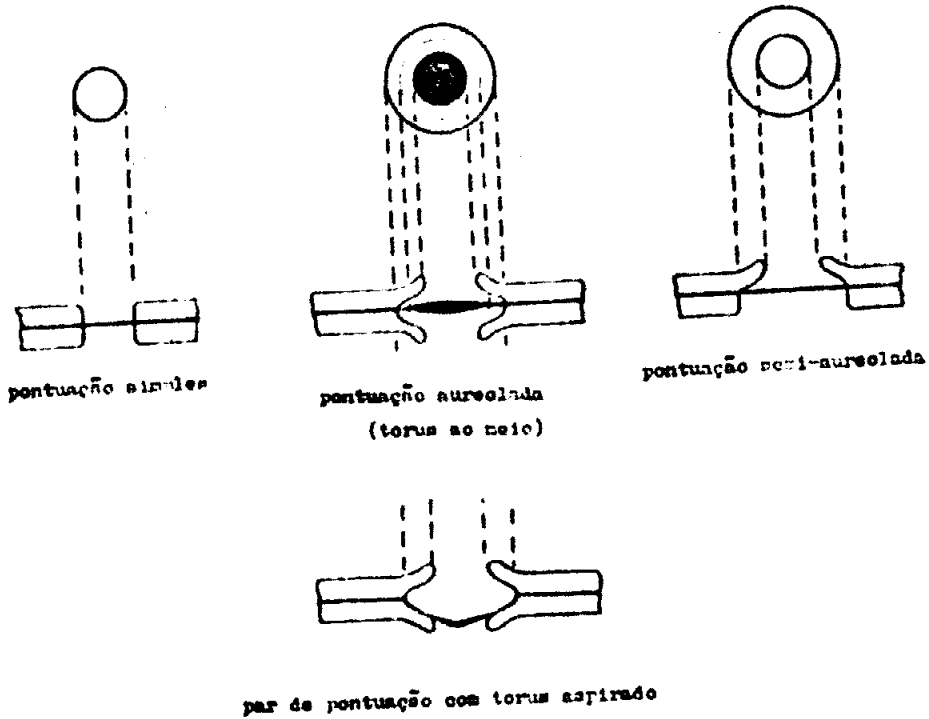


Figura 11 : Pares de pontuação

Na membrana que separa as duas pontuações de um par de pontuações aureoladas, normalmente se forma um espessamento chamado torus, em geral, na parte central. Os torus são bem desenvolvidos nas pontuações aureoladas de traqueídos de coníferas, mas são reduzidos ou ausentes em vasos e fibras. As membranas às vezes são tão delicadas e finas que mostram micro-perfurações por onde passam macro-elementos da seiva.

Através das pontuações é que a seiva flui de uma célula para outra. Nos traqueídos de coníferas, o sistema condutor é todo baseado no funcionamento das pontuações.

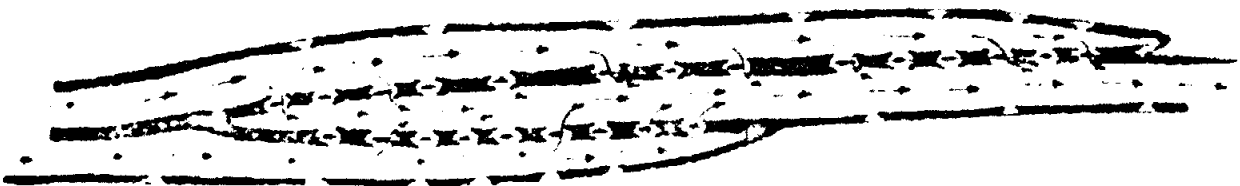


Figura 12 : Condução da seiva nos traqueídos

As pontuações ocorrem em maior número nas seções radiais das células, sendo mais frequentes nas extremidades. Nos traqueídos de lenho inicial, as pontuações são mais numerosas e mais desenvolvidas.

As pontuações são elementos valiosos na identificação de espécies, especialmente para coníferas. As regiões onde as pontuações apresentam formas mais típicas são justamente as áreas de cruzamento com o raio dos traqueídeos.

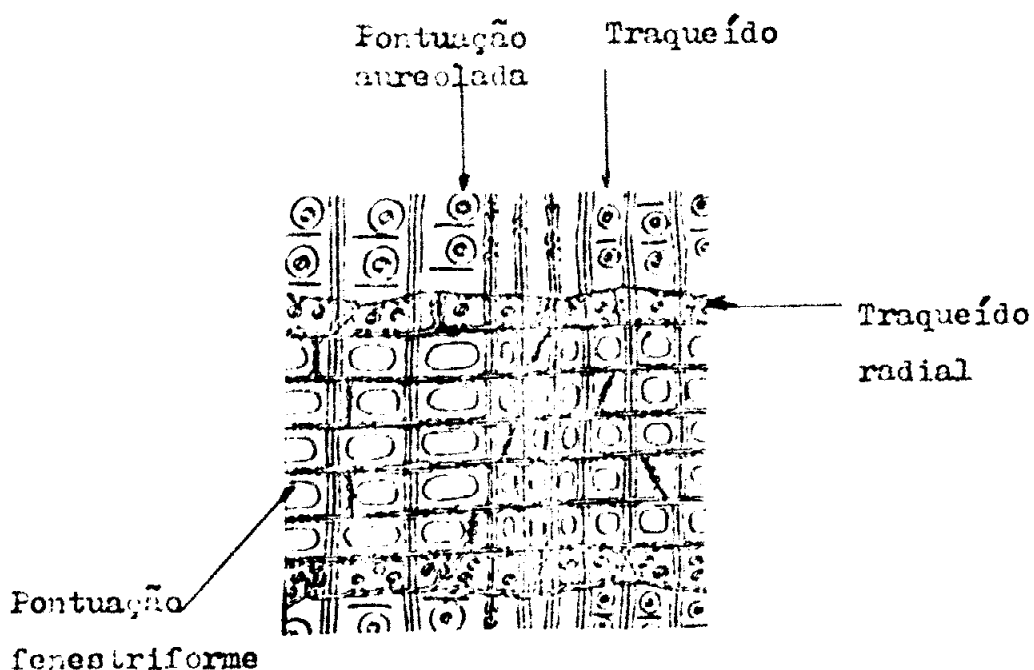


Figura 13 : Área de cruzamento de traqueídeos com o raio medular em *Pinus*

De acordo com a forma apresentada pela pontuação na área de cruzamento com o raio ela é denominada: pinóide, cupressóide, taxóide, piceóide e fenestriforme.

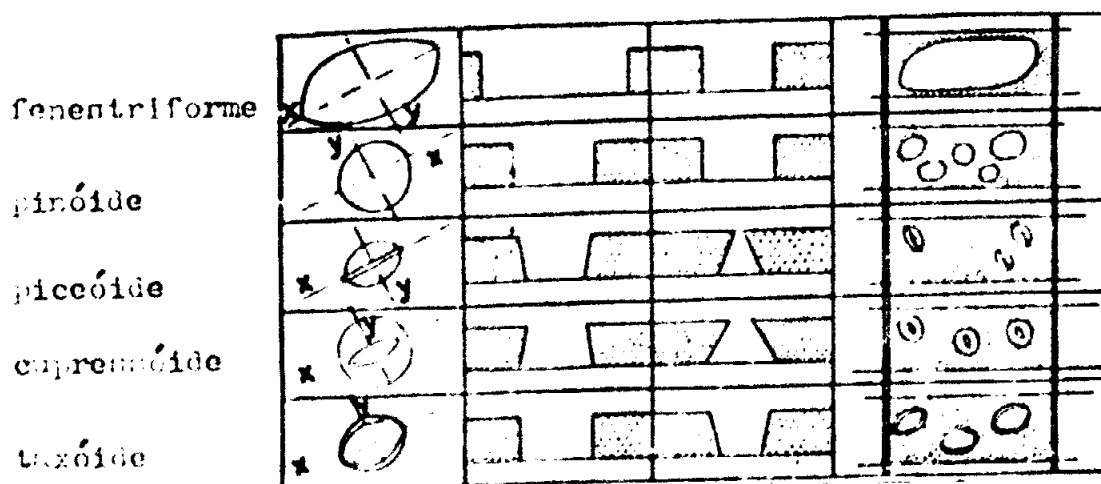


Figura 14 : Principais formas de pontuações na área de cruzamento dos traqueídeos com o raio medular.

Outros tipos de modificações que pode ocorrer na parede celular são as perfurações que ocorrem na forma individual ou de placas de perfurações. São aberturas nas extremidades, principalmente dos elementos dos vasos, que permitem a comunicação entre eles. Através destas perfurações é que a seiva circula na madeira de folhosas.

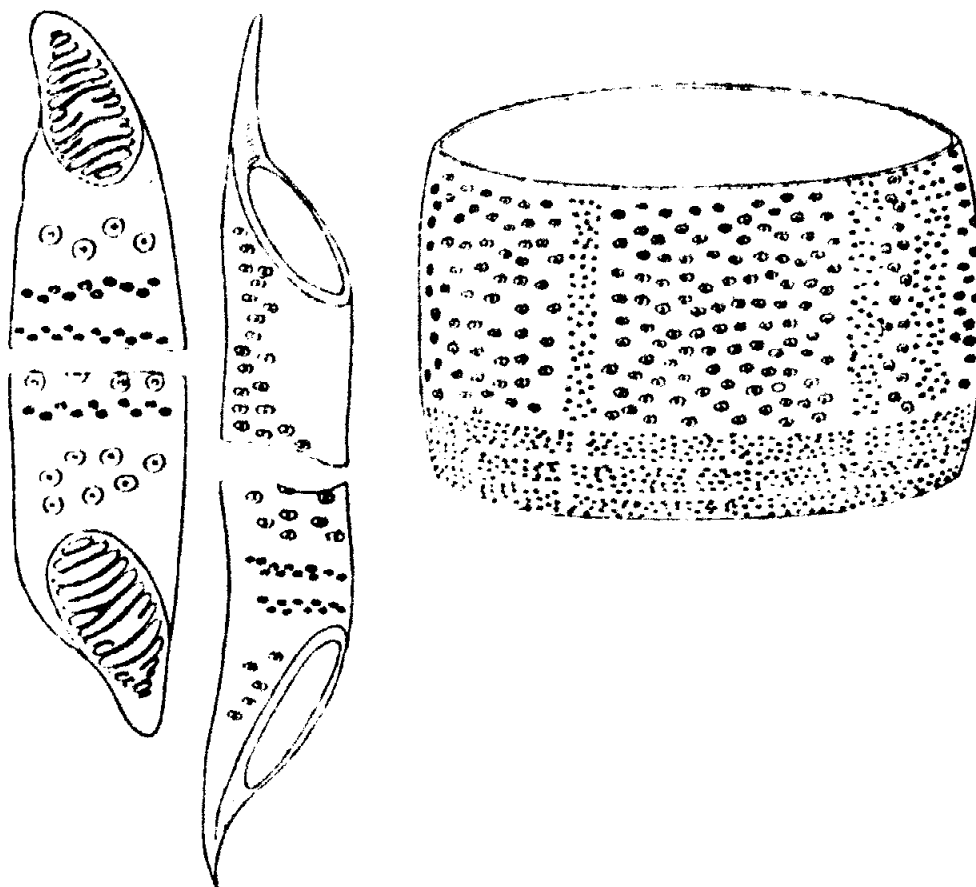


Figura 15 : Elementos dos vasos com perfurações

5.3 Estrutura e organização da parede celular

Paredes celulares de vegetais certamente são os mais abundantes e importantes produtos da Natureza. Elas são o resultado da transformação da energia solar em outro tipo de energia que é disponível ao homem.

As paredes das células lenhosas são constituídas principalmente de compostos celulósicos e a organização destes compostos para formar a parede é que confere grande parte das características físicas da madeira.

A estrutura e organização da parede celular das fibras é um assunto bastante discutido. As descobertas ou as novas idéias que cada grupo de investigadores trazem à literatura tem causado inúmeras polêmicas.

De acordo com o ponto de vista tradicional, as paredes celulares estão envolvidas por um meio amorfo que é a lamela média. A parte mais externa da parede é chamada parede primária. Como a parede primária é justamente aquela que mais se expande em área durante o crescimento da célula, é natural que ela exiba uma distribuição irregular das microfibrilas.

Durante o espessamento da parede secundária, as microfibrilas foram sendo depositadas ordenadamente em camadas típicas.

Assim, a parede secundária das fibras normais, incluindo traqueídeos, fibro-traqueídeos e fibras libriformes, é dividida em três camadas concêntricas: S_1 , S_2 e S_3 .

A cavidade deixada no interior da célula é o lúmen.

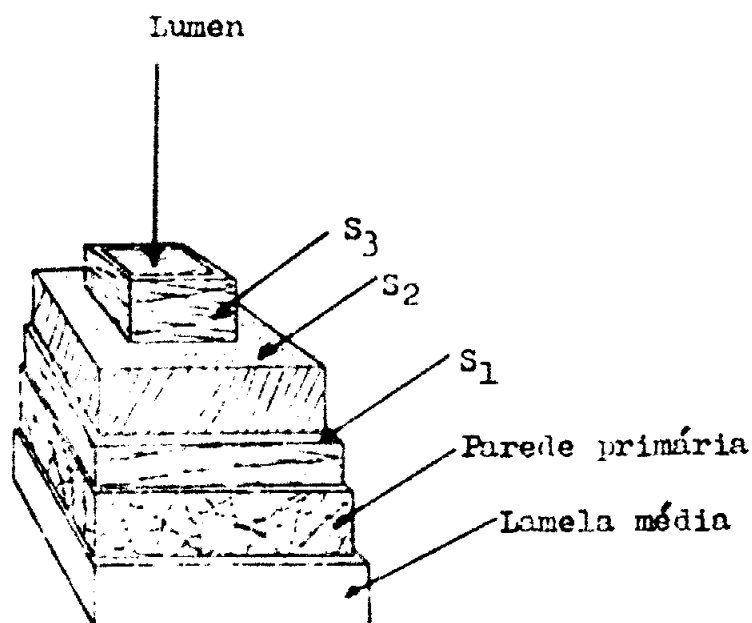


Figura 16 : Estrutura da parede celular

Os vasos podem ter outras camadas adicionais:

S₄, S₅, etc.

Cada uma destas camadas é constituída de lamelas, por exemplo, 4 a 6 para S₁ e S₃ e 30 a 150 para a camada S₂, a mais espessa.

Em termos de espessura tem-se

P	:	0,1	a	0,2	μ
S ₁	:	0,2	a	0,5	μ
S ₂	:	1	a	5	μ
S ₃	:	0,2	a	0,3	μ

Em células de xilema é possível ocorrer também

uma última camada, aderida à camada S_3 , constituída da deposição es do material citoplasmático quando a célula morreu. É a camada verrugosa.

A disposição das microfibrilas nas três camadas da parede secundária é característica. A rede de microfibrilas que era irregular na parede primária já toma uma disposição mais uniforme, tendendo a horizontal ou com ângulo aberto na camada S_1 . Em S_3 o mesmo tipo de orientação ocorre. Já na camada S_2 , que é a camada mais importante da fibra, as microfibrilas adquirem uma orientação helicoidal. O ângulo formado pelas microfibrilas com o eixo da fibra é o ângulo fibrilar e ele é importante pois se relaciona com o comprimento e com a resistência individual da fibra. Os ângulos fibrilares médios de cada camada são os que se seguem: $S_1 = 50$ a 70° ; $S_2 = 10$ a 30° ; $S_3 = 60$ a 90° .

A orientação das microfibrilas na camada S_2 confere alta resistência à tração à fibra, enquanto a orientação das camadas S_1 e S_3 dão resistência à compressão e torção.

A camada S_1 pelo fato de ter um alto ângulo fibrilar, age como uma cinta na fibra.

Assim, quando a fibra se hidrata e incha, a camada S_1 tende a restringir a expansão. No local, porém, onde a camada S_1 se quebra ocorre um inchamento característico conhecido por embalramento.

Do ponto de vista de tecnologia de celulose e papel as microfibrilas são importantíssimas. Para o desenvolvimento da resistência do papel faz-se necessário aumentar a ligação entre fibras e isso é conseguido por tratamento mecânico das

fibras (refinação e moagem). Por este tipo de tratamento as microfibrilas se liberam em parte da estrutura organizada que tinham na parede celular e aumentam a superfície de ligação entre fibras.



Figura 17 : Microfibrilas liberadas da estrutura da parede celular

5.4 Elementos estruturais básicos da parede celular

Durante muito tempo acreditou-se que as microfibrilas eram o resultado do arranjo das moléculas de celulose e constituíam o último grau de arranjo entre elas.

Hoje já existem outras teorias mais precisas que surgiram principalmente devido ao melhoramento das técnicas de microscopia e cristalografia.

Conforme se sabe, a celulose ocorre nas plantas na forma de longas cadeias, resultado do agrupamento de inúmeras moléculas.

O agrupamento se deve a várias causas:

- a. a molécula possui uma forma comprida que lembra um fita;
- b. as ligações β -1,4 dos carbonos dão à cadeia alta rigidez;
- c. numerosos grupos hidroxilos existem na superfície da molécula, colaborando para a ligação lateral das cadeias celulósicas.

O arranjo paralelo das moléculas de celulose dá uma estrutura cristalina à celulose. Em outras regiões esta cristalinidade se perde porque as cadeias celulósicas perdem o arranjo paralelo.

O menor grupo individual associado com cristalinidade é a célula unitária. Esta possui uma forma paralelepípedica no sistema monoclinico.

Numa seção transversal, consiste de cinco cadeias de celulose arranjadas em X. Ela tem porém um comprimento definido que é o de duas unidades de anidro glucose, ou melhor, uma molécula de celobiose. Estas cinco moléculas de celobiose são reunidas juntas pela atração eletrostática dos grupos hidroxilos.

A célula unitária da organização cristalina é uma estrutura hipotética que não existe como uma entidade independente. Constitui-se tão somente numa definição de um modelo básico de orientação das moléculas.

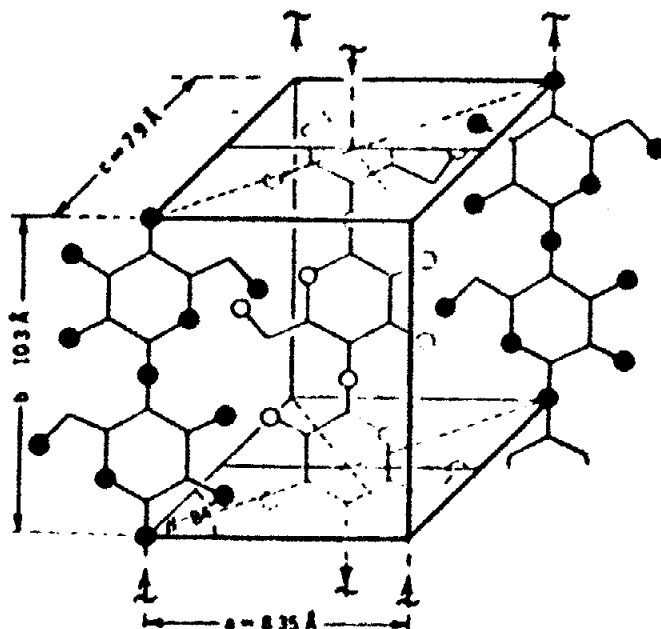


Figura 18 : Célula unitária da estrutura linear da celulose
($1 \text{ \AA} = 10^{-4} \mu$)

Como as células unitárias são estruturas hipótéticas e como as moléculas de celulose se unem entre si formando arranjos, com certeza existem agregados de moléculas que formam estruturas reais. O assunto é bastante controverso.

Até recentemente acreditava-se que eram as microfibrilas os primeiros elementos estruturais formados pelas moléculas de celulose. Hoje porém, é quase que totalmente aceite, que os menores agregados de moléculas de celulose são as fibrilas elementares. Estas consistem de 37 a 42 moléculas para-

lelas da celulose em um modelo que possui diâmetro médio de 35Å.

Por sua vez, as fibrilas elementares se agrupam em microfibrilas que possuem formas de fitas e com larguras de 100 a 300Å, espessura de 50 a 100Å e comprimento de alguns microns.

Para se ter uma idéia do comprimento de uma molécula de celulose basta atentarmos que uma unidade de anidro glucose, que forma a molécula de celulose, tem 5,15Å de comprimento. Por grau de polimerização entende-se o número de unidades de anidro glucose que forma a molécula de celulose. Este grau, para a celulose natural nas plantas, varia de 5 a 10 mil. Assim estima-se o comprimento da molécula de celulose de 2,5 a 5 μ. Esta dimensão encontra-se dentro do poder de resolução dos microscópios, mas dada a reduzida espessura da molécula, a mesma não pode ser observada isoladamente por instrumentos óticos.

A organização das fibrilas elementares em microfibrilas não é completamente cristalina. A microfibrila é altamente ordenada em certas partes com comprimento de 50 a 600Å. Estas partes ordenadas são chamadas cristalitos, os quais se alternam com partes mais curtas no comprimento da microfibrila, que não possuem ordem e exibem alta porosidade. São as regiões amorfas.

Entre as fibrilas elementares existem espaços vazios de até 10Å de diâmetro, formando capilares que podem ser preenchidos por lignina. Estas cavidades são paralelas à direção das microfibrilas e constituem os microcapilares que formam também uma rede capilar na parede celular. O volume de microcapilares é máximo na madeira saturada e mínimo na madeira seca.

A presença destes espaços dentro da parede celular faz com que a densidade da parede seja aparente, inferior à densidade da substância parede. Tem-se observados valores de 0,7 a 1,5 g/cm³ para a densidade aparente da parede celular.

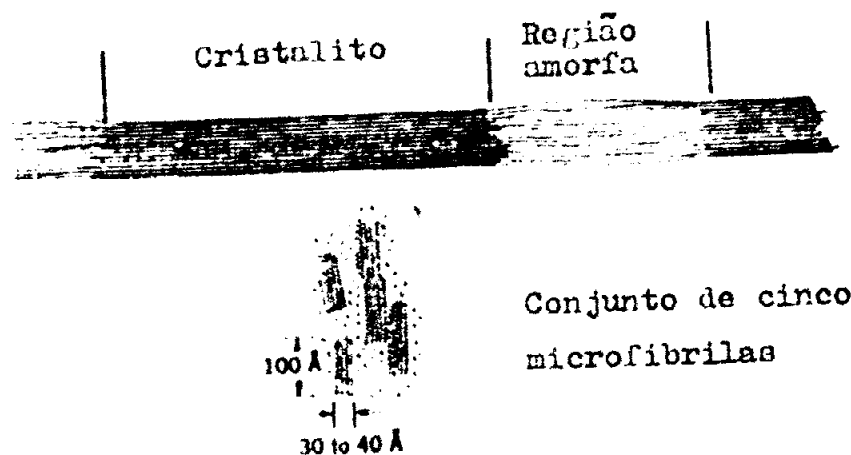


Figura 19 : Organização microfibrilar

A lignina ocorre nas paredes das fibras como um polímero tridimensional ramificado que envolve as microfibrilas. A rigidez e a dureza da madeira são devidas à lignina, cuja presença faz decrescer a higroscopicidade.

A forma como os constituintes da parede celular se arranjam pode ser explicada pela teoria da matriz reforçada. Segundo ela, parede celular é uma estrutura onde cordões de microfibrilas estão embebidos em uma matriz constituída de hemiceluloses, lignina e extrativos. As microfibrilas, em forma de fitas, são alinhadas lado a lado na matriz, formando lamelas finas e descontínuas de celulose. Estas se juntam formando camadas e por sua vez a parede celular.

A teoria de organização molecular da parede celular que foi apresentada consistiu na síntese de um grande número de proposições feitas por muitos autores. Existem muitas controvérsias sobre o assunto.

Recentemente, uma teoria completamente revolucionária foi apresentada por Manley, 1964. Este autor propõe que a molécula de celulose tem uma estrutura semelhante a uma fita dobrada que é novamente dobrada em disposição helicoidal. Cada unidade de celobiose seria dobrada de costas para a unidade de celobiose precedente, formando o conjunto uma fita. Esta fita por sua vez seria dobrada helicoidalmente, com pequeno ângulo. A teoria de Manley é conhecida como teoria da dupla dobra da molécula de celulose, ou teoria do dobramento da cadeia.

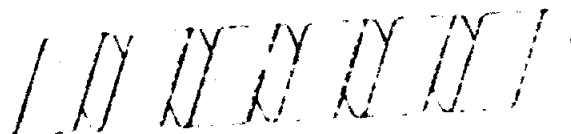


Figura 20 : Estrutura da molécula de celulose de acordo com a teoria da dupla dobra

6. ESTRUTURA DA MADEIRA

Embora, por uma análise grosseira, a madeira pareça uma substância compacta e homogênea, trata-se de um material constituído de inúmeros elementos celulares, unidos entre si formando tecidos, que, por sua vez, são diferenciados conforme a função que desempenham.

É o conjunto e o arranjo dos elementos do lenho que definem a sua estrutura. Ainda que as madeiras sejam todas formadas basicamente dos mesmos elementos, as modificações de forma, tamanho e arranjo dos componentes, tornam diferentes as estruturas das diversas espécies. Embora exista também uma variabilidade da madeira dentro da mesma espécie e dentro de uma mesma árvore, a estrutura básica das madeiras pertencentes a uma mesma espécie mantém-se constante. Esta característica torna possível a classificação e identificação das madeiras por observação dos seus elementos.

Dentro de certos limites, o estudo de estrutura da madeira permite também avaliar as possibilidades de sua aplicação.

Através técnicas simples é possível a individualização dos elementos anatômicos que constituem a madeira. Como se sabe, a madeira é resultado da união de inúmeros elementos. Dissolvendo-se as substâncias que mantem estes elementos unidos, eles se individualizam. Neste processo de simples individualização é que se baseia toda a indústria de celulose. Os meios utilizados para a separação dos elementos da madeira podem ser mecânicos, químico-mecânicos, termo-mecânicos e químicos.

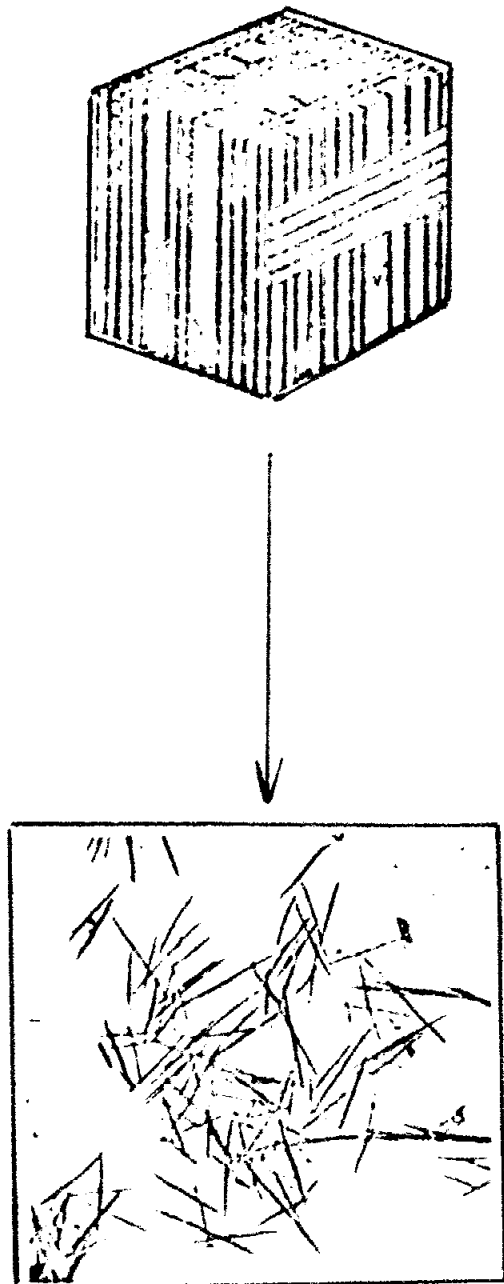


Figura 21 : Individualização dos elementos estruturais da madeira

O fato de todas as células componentes da madeira serem originadas das células cambiais fusiformes iniciais ou iniciais do raio, resulta numa orientação definida que permite a separação de todos os elementos que formam a madeira em dois sistemas: longitudinal, originada das fusiformes iniciais e radial, formado a partir das células iniciais do raio.

As células que compõem a madeira podem ser de dois tipos:

- A. prosenquimatosas: possuem função mecânica ou de condução. São células onde o comprimento é bem maior que a largura. Dentre as células prosenquimatosas destacam-se:
 - a) Traqueídeos: possuem função de sustentação e condução. São células alongadas e lignificadas, sem perfurações nas extremidades, apresentando pontuações aureoladas bastante desenvolvidas. Compõem cerca de 90 % do volume total da madeira de coníferas.
 - b) Elementos dos vasos: são elementos de condução de seiva, possuindo as extremidades perfuradas. Ligam-se pelas extremidades a outros elementos de vasos formando estruturas com aspecto de tubulações que se orientam axialmente. Como são estruturas largas e ocas, é possível em muitos casos a observação dos mesmos a olho nu, na seção transversal. São também chamados poros, daí as madeiras de folhas serem também denominadas madeiras porosas. Apresentam pontuações aureoladas.
 - c) Fibras: são elementos lignificados alongados, com extremidades afiladas. Quando apresentam pontuações simples são denominadas fibras libriformes. No caso de terem pontuações aureoladas denominam-se fibro-traqueídeos.

- d) Traqueídeos vasicêntricos: são elementos curtos, de forma irregular, com pontuações aureoladas bem visíveis.
 - e) Traqueídeos vasculares: são semelhantes à vasos porém sem as perfurações das extremidades.
- B. parenquimatosas: são células cuja função principal é a reserva e distribuição de carboidratos. As células de parênquima são curtas, de paredes finas e pontuações simples. São as células dos raios lenhosos, do parênquima axial e células epiteliais dos canais de resina.
- a) Raios lenhosos: são compostos de células vivas ou mortas e servem para armazenar reservas ou para condução lateral. Desde que eles variam em tamanho, forma, número e estrutura, eles são importantes características para identificação da madeira. Todas as células que compõem o raio podem ser similares e alongadas horizontalmente ou apresentar uma ou mais camadas marginais de formas diferentes.
 - b) Parênquimas axiais: são constituídos de células de reserva e condução, mas ao invés de localizadas horizontalmente, o são verticalmente. O parênquima axial ocorre na quase totalidade das folhosas e em algumas coníferas. Em contraste às fibras, as células do parênquima axial não se alongam durante a maturação, mantendo o mesmo tamanho das células iniciais do parênquima.

A determinação da proporção entre os elementos constituintes do lenho é feita em seções transversais da madeira, com o auxílio do microscópio. Existe um método gráfico para relacionar os diversos tipos de elementos anatômicos. O método consiste num triângulo equilátero, em que cada lado corresponde às porcentagens de cada elemento anatômico.

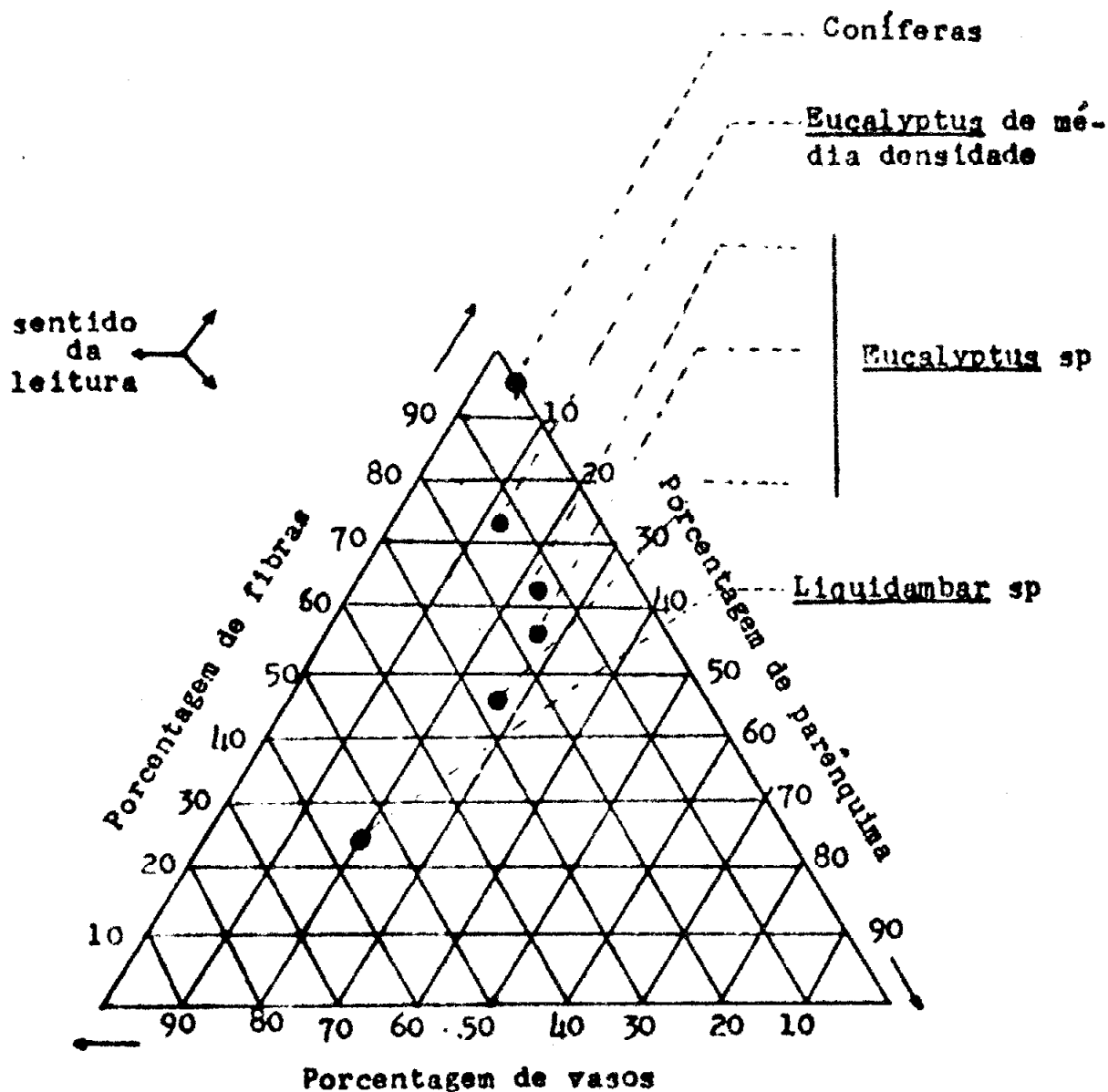


Figura 22 : Correlação entre os teores dos elementos anatômicos de diferentes madeiras

Observe-se que as madeiras de coníferas localizam-se próximo ao vértice superior do triângulo. Muitas espécies de Eucalyptus também se situam perto deste ápice. Quanto mais próximo deste vértice, maior o teor de fibras que a madeira contém.

6.1 A madeira de coníferas

As madeiras de coníferas são bastante uniformes em estrutura. Os principais elementos lenhosos são os traqueídeos, chamados vulgarmente de fibras e as células de parênquima. Volumetricamente, a relação porcentual entre traqueídeos e parênquima é 9:1. Os traqueídeos são células longas em relação ao seu diâmetro: variam de 1 a 9 mm em comprimento e de 30 a 60 μ em largura. A maioria das espécies apresentam anéis de crescimento bem definidos, compostos de um lenho inicial de células com paredes delgadas e de um lenho tardio, com traqueídeos de paredes espessas. Tanto comprimento de fibra como espessura da parede celular variam bastante em coníferas. Há considerável variação destas características entre espécies, dentro da espécie e dentro de uma única árvore. Em virtude da uniformidade da estrutura, as alterações na espessura da parede são intimamente correlacionadas com a densidade da madeira. Por esta razão, a densidade da madeira é usualmente aceita como um bom índice de qualidade da madeira. Existe também uma alta correlação entre densidade da madeira e relação lenho inicial/lenho tardio, visto que o aumento da porcentagem de lenho tardio corresponde a maior quantidade de fibras com paredes espessas. Assim, em termos práticos, a densidade pode ser utilizada para se avaliar a qualidade da madeira. Entretanto, deve-se levar em consideração, que a porção central do caule, devido a formação do cerne, tem suas cavidades celulares preenchidas por ex-

trativos, e a densidade é alta, sem que haja correlação entre lenhos inicial e tardio.

As madeiras de coníferas são relativamente simples. Os seguintes elementos são observados em madeiras de coníferas:

A) Elementos longitudinais

- a. Prosenquimatosos: traqueídeos
- b. Parenquimatosos : células epiteliais dos canais de resina longitudinal e parênquima longitudinal

B) Elementos radiais

- a. Prosenquimatosos: traqueídeos radiais
- b. Parenquimatosos : células parenquimatosas do raio e células epiteliais dos canais de resina transversais.

Os canais de resina, tão frequentes nas madeiras de coníferas, não são elementos anatómicos. São apenas dutos ou aberturas na madeira rodeados por células secretoras chamadas epiteliais.

Seção transversal

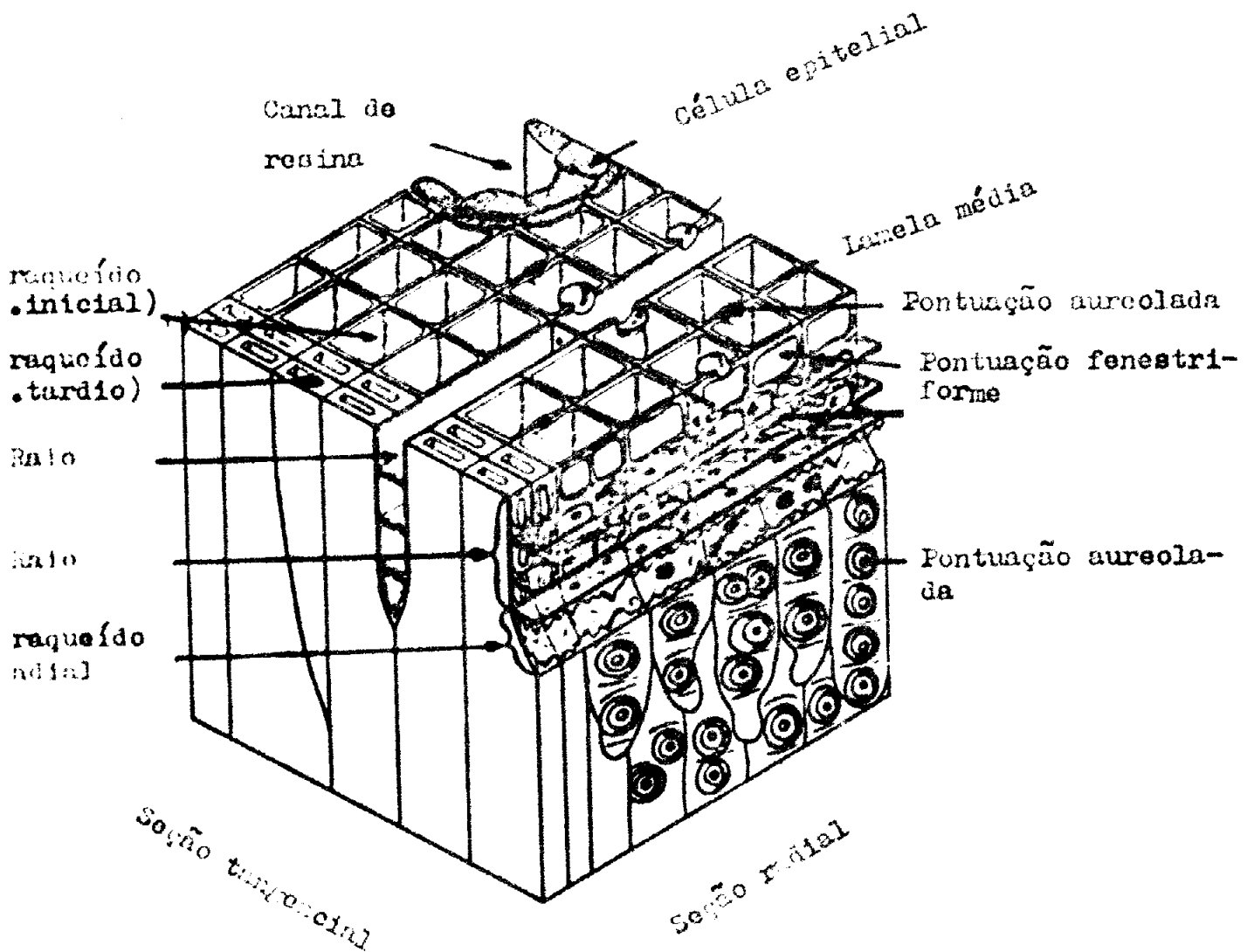


Figura 23 : Estrutura da madeira de coníferas

6.2 A madeira de folhosas

Além do número extremamente maior de espécies que compõem este grupo de vegetais, existe uma ampla variação na estrutura de suas madeiras. Vasos, parênquima, fibras libríformes, fibro-traqueídeos e outras células especializadas arranjam-se em inúmeras formas para compor suas madeiras. Também para folhosas, o comprimento da fibra e a espessura da parede celular são características importantes. Entretanto para estas madeiras a densidade não depende apenas da estrutura da parede celular, mas também da proporção dos vários tecidos presentes. Dentro de uma espécie, esta proporção é mais ou menos constante e a espessura da parede controla as variações da densidade. Isso é verdadeiro também dentro de muitos gêneros. Entretanto, para espécies de gêneros diferentes, as variações em densidade não mostram apenas a espessura da parede mas também a proporção e dimensão dos elementos presentes. As fibras libríformes de folhosas são curtas e finas. O comprimento varia de 0,7 a 2 mm e a largura de 10 a 30 μ . Os vasos são muito largos, entre 50 a 300 μ . As células parênquimatosas são curtas, de paredes delgadas e com largura semelhante à das fibras. As fibras representam, em geral, 60% do volume da madeira, os vasos 20% e o parênquima 30%.

As folhosas representam um estágio mais evoluído no reino vegetal, possuindo assim tecidos mais especializados e complexos que os das coníferas.

São os seguintes os elementos anatómicos que aparecem nas madeiras de folhosas:

A) Elementos longitudinais:

a. Prosengimatosos: fibras libríformes, elementos dos va-

nos, fibro-traqueídeos, traqueídeos vasicêntricos e traqueí -
dos e traqueídeos vasculares.

- b. Parenquimatosos: parênquima longitudinal e células epiteli -
ais dos canais de goma.

B) Elementos radiais

- a. Prosenquimatosos: não ocorrem
- b. Parenquimatosos: células parenquimatosas do raio e células
epiteliais dos canais transversais de goma.

Seção transversal

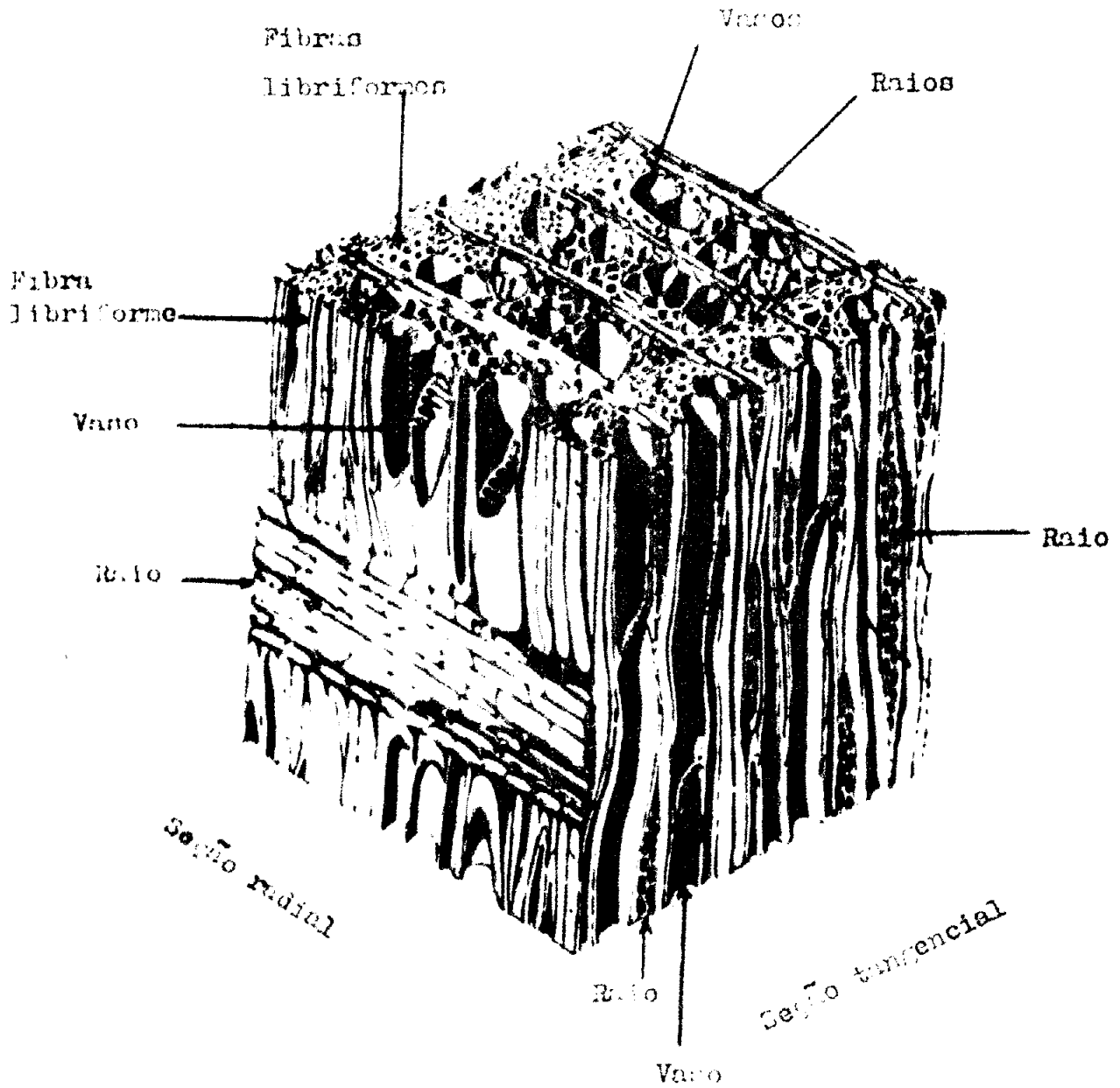


Figura 24: Estrutura da madeira de folhosas

6.3 Comparações entre madeiras de coníferas e folhosas

Na figura 25 estão apresentados todos os elementos anatómicos básicos que compõem uma madeira de conífera ou folhosa. Conforme se pode notar, todos são originários do câmbio, a partir das células fusiformes iniciais e das iniciais do raio.

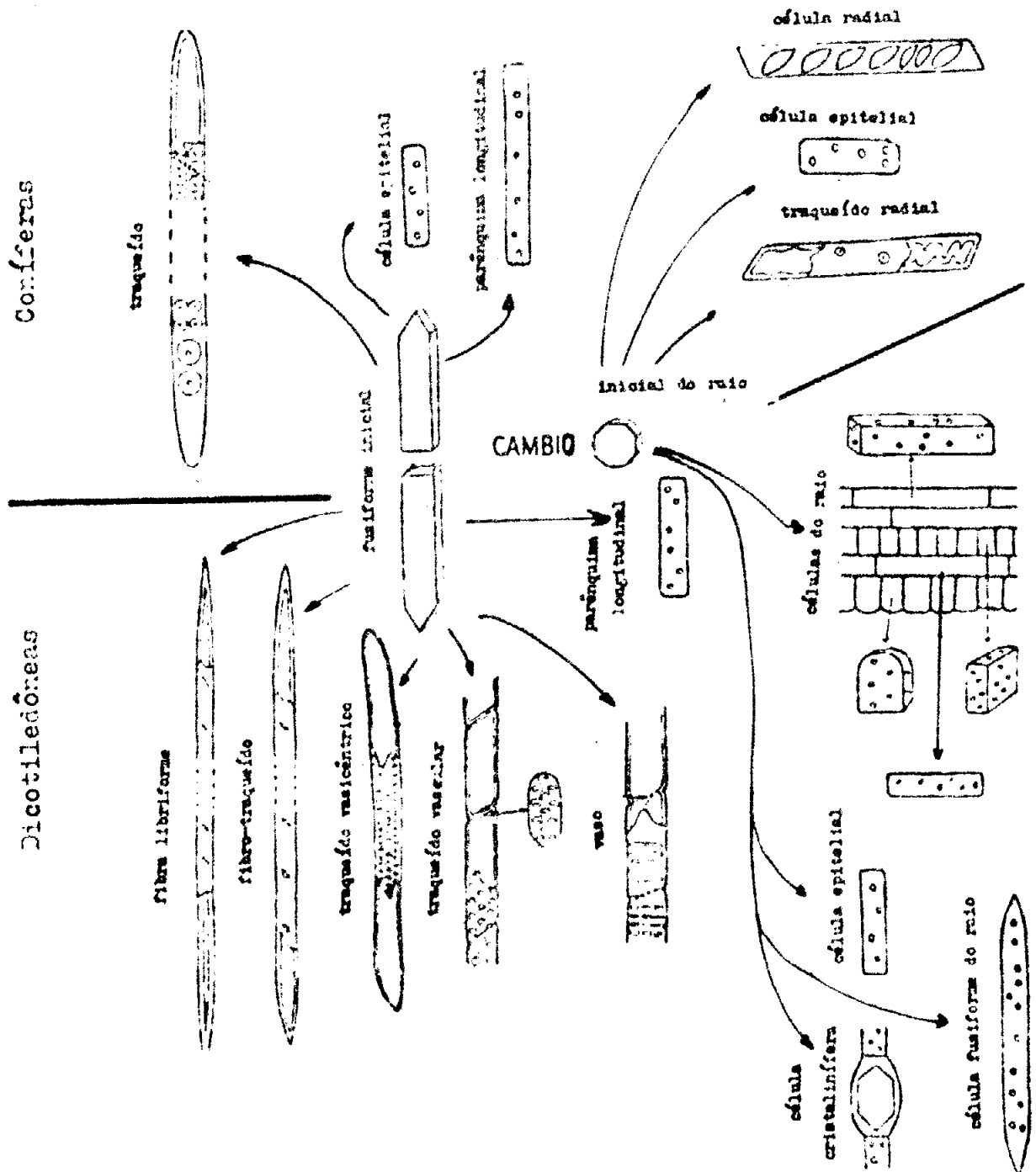


Figura 25 : Elementos anatómicos constituintes das madeiras

Numa comparação entre a estrutura da madeira de coníferas e folhosas observam-se as seguintes diferenças principais:

- a. a estrutura da madeira de folhosas é muito mais complexa;
- b. as folhosas possuem vasos enquanto as coníferas não os possuem;
- c. na seção transversal das coníferas pode-se notar um alinhamento radial dos elementos o que não se observa nas folhosas;
- d. em geral as coníferas apresentam raios unisseriados e as folhosas multisseriados, embora o gênero Eucalyptus mostre normalmente raios unisseriados.

7. PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

7.1 Teor de umidade

O teor de umidade da madeira para tecnologia de celulose é determinado com base no peso inicial úmido e no peso absolutamente seco, que é o peso obtido após secagem em estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.

$$\%U = \frac{P \text{ úmido} - P \text{ as}}{P \text{ úmido}} \times 100$$

A madeira para celulose é comumente transportada ainda úmida, desta forma, o teor de umidade é importante para se calcular o peso seco e o peso úmido que se está transportando.

O teor de umidade é também uma importante ca-

racterística para o processo de cozimento. É comum atualmente, com a adoção de cozimentos contínuos para a produção de celulose, se desejar a maior umidade possível para a madeira. Madeiras muito secas são mais difíceis de serem reduzidas a cavacos, há maior formação de serragem nesta operação, e a penetração do licor é dificultada.

Tem-se notado que as madeiras dos ponteiros e do alburno são as mais úmidas da árvore. As toras mais finas, com maior teor de alburno são às vezes mais pesadas que toras mais grossas, embora tenham menor densidade. A razão é o seu maior teor de umidade.

A madeira quando verde contém entre 40 e 60% de umidade. Enquanto armazenada ela perde umidade para o ar até alcançar o teor de umidade de equilíbrio que está entre 10 a 15%.

A célula lenhosa contém umidade de duas formas. A maioria da umidade é chamada água livre e é encontrada nas cavidades da célula. Esta água livre é a primeira umidade que se perde para a atmosfera quando a madeira seca. A água remanescente, chamada água de embebição é encontrada entre as fibras na parede celular. Quando toda a água livre da madeira se perdeu diz-se que a madeira atingiu o ponto de saturação das fibras.

7.2 Porosidade

A porosidade da madeira constitui-se em importante propriedade para a produção de celulose. Distinguem-se dois tipos de porosidade:

a) Macroporosidade

Constitui-se em todos os vazios em forma de canais que a madeira possui e que são possíveis de serem observados na faixa de percepção do microscópio ótico.

b) Microporosidade

Refere-se aos espaços vazios na estrutura sub-microscópica da madeira. A microporosidade das paredes das fibras é fator de máxima importância na penetração do licor de cozimento; no refino das fibras conduzindo a maior flexibilidade; na capacidade de hidratação destas fibras, e, na resistência das ligações entre fibras da folha de papel.

7.3 Higroscopicidade

É a capacidade da madeira absorver água. É importante o seu conhecimento quando se deseja transportar a madeira pela água de rios ou lagos e também no que diz respeito à penetração dos licores de cozimento.

A higroscopicidade é calculada através da seguinte fórmula:

$$\mu \text{ max} = \mu \text{ sat} + \frac{1,53-d}{1,53d} \times 100$$

onde

$\mu \text{ max}$ = absorção máxima

$\mu \text{ sat}$ = absorção no ponto de saturação das fibras

d = densidade básica da madeira

Através desta expressão pode-se observar que

quanto maior a densidade, menor será a absorção máxima de água pela madeira.

7.4 Permeabilidade

Permeabilidade é o termo usado para indicar a velocidade do fluxo de gases e fluídos na madeira. É propriedade de importante para a produção de celulose, onde os licores tem que ser introduzidos dentro da madeira.

A permeabilidade da madeira se relaciona com o tamanho das aberturas que existem na estrutura da madeira. O fluxo é regulado pelas leis da capilaridade e das leis que regem o fluxo em tubulações.

A permeabilidade longitudinal das madeiras de coníferas é menor que as de folhosas. Isso porque, todos os líquidos ou gases devem passar através a lamela média composta das pontuações, onde as aberturas são diminutas. Para as folhosas, o movimento dos líquidos e gases é mais fácil em virtude dos maiores capilares. Entretanto a permeabilidade para as folhosas é extremamente variável entre espécies, devido principalmente às variações no tamanho e número de vasos, na presença ou não de tiloses, etc.

A permeabilidade lateral é muito menor (1000 a 100000 vezes) que aquela na direção longitudinal. Existe uma ligeira diferença nas permeabilidades radial e tangencial, sendo a radial maior.

7.5 Densidade básica

A densidade da substância madeira é de aproxima

madamente 1,53. Entretanto como a madeira possui vazios, e como ela possui a capacidade de se contrair quando seca, a densidade que normalmente se mede é aparente.

Tentando evitar o efeito das variações dimensionais da madeira é que se determina a densidade básica da madeira. Esta se baseia no volume verde da madeira que é o máximo volume que ela atinge. A madeira quando absorve água acima do ponto de saturação das fibras não sofre mais variação dimensional. É por isso que se pode também trabalhar com o volume da madeira no seu máximo teor de umidade ou completa saturação.

A densidade básica da madeira é definida como

$$d_b = \frac{P \text{ absolutamente seco}}{\text{Volume verde}}$$

A densidade básica expressa em gramas por centímetro cúbico é numericamente equivalente ao peso específico básico, visto que o último é meramente resultado da divisão da densidade básica da madeira pela densidade da água a 4°C, igual a 1.

A densidade das madeiras varia em função da espessura da parede celular e da quantidade de vazios correspondentes às cavidades da madeira. Na prática as madeiras comerciais possuem densidade básica entre 0,35 a 0,65 porém encontram-se valores extremos tão altos como 1,40 e baixo como 0,04.

A madeira do lenho tardio é mais densa que a de lenho inicial e a madeira formada próxima à casca é geralmente mais densa que a formada próxima à medula.

A densidade da madeira é particularmente importante no caso de compra de madeira para celulose, visto que no Brasil a unidade de comercialização de madeira é o estéreo, que é uma unidade de volume (1 estéreo \approx 0,714 m³ sólido). Como celulose é comercializada na base de peso, dentro de certos limites, interessa adquirir madeira com maior densidade, pois se está comprando pelo mesmo preço, maior quantidade de matéria seca ou de fibras. Existem porém certas propriedades da celulose que são afetadas negativamente pelo aumento exagerado da densidade.

Existem diversos métodos para a determinação da densidade básica. Os mais usuais são o método do máximo teor de umidade e o método da balança hidrostática.

7.5.1 O método do máximo teor de umidade

Em 1954, baseando-se na relação entre a densidade básica e o máximo teor de umidade da madeira KEYLWERTH desenvolveu um método que depois foi empregado com sucesso por SMITH (1954,1955) e motivo de estudos por FOELKEL e COLABORADORES (1971) e os resultados foram bastante satisfatórios. Recentemente, crescente atenção tem sido dada ao método, cuja utilização tem-se difundido bastante.

7.5.1.1 Dedução da equação utilizada no cálculo da densidade básica

FOELKEL e COLABORADORES (1971) apresentaram a seguinte equação para cálculo da densidade básica da madeira com base no método do máximo teor de umidade.

$$d_b = \frac{l}{\frac{P_t}{P_s} - 0,346}$$

onde:

d_b = densidade básica da madeira

P_t = peso ao ar dos cavacos saturados

P_s = peso absolutamente seco dos cavacos, conseguido através secagem em estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ até peso constante

Esta equação origina-se de um simples balanço de material estabelecido em relação a um bloco de madeira saturado com água.

a. Seja portanto, um bloco de madeira totalmente saturado com água, ou melhor, em seu máximo teor de unidade. A hipótese mais importante do método é que todos os espaços vazios da madeira encontram-se ocupados por água, de forma que no bloco saturado em questão só existam água e substância madeira.

b. Seja:

P_a = peso da água existente no bloco

P_s = peso da substância madeira existente no bloco

P_t = peso total do bloco

V_a = volume de água existente no bloco

V_m = volume de madeira no bloco

V_t = volume total do bloco de madeira

c. Sabe-se que:

$$P_a + P_s = P_t \quad (I)$$

e que

$$V_a + V_m = V_t \quad (II)$$

d. Dividindo-se ambos os termos da equação (II) por P_s ela não se altera matematicamente.

$$\frac{V_a + V_m}{P_s} = \frac{V_t}{P_s}$$

$$\frac{V_a}{P_s} + \frac{V_m}{P_s} = \frac{V_t}{P_s}$$

e. Tomando-se a densidade da água como igual a 1 nas condições em que se realiza o experimento, o volume de água equivale ao seu peso.

Portanto:

$$\frac{P_a}{P_s} + \frac{V_m}{P_s} = \frac{V_t}{P_s}$$

f. Entretanto, tem-se que:

$$\frac{P_a}{P_s} = \frac{P_t - P_s}{P_s} = \frac{P_t}{P_s} - 1 \quad (III)$$

$$\frac{V_m}{P_s} = \frac{1}{d_m} \quad (IV)$$

onde d_m é a densidade da "substância madeira". Admitindo-se que a densidade média da substância madeira é 1,53, tem-se

$$\frac{V_m}{P_s} = \frac{1}{1,53} = 0,654$$

e

$$\frac{V_t}{P_s} = \frac{1}{d_b} \quad (V)$$

g. Substituindo-se os valores obtidos no ítem f, na equação do ítem e:

$$\frac{1}{d_b} = \frac{P_t}{P_s} - 1 + 0,654$$

$$\frac{1}{d_b} = \frac{P_t}{P_s} - 0,346$$

$$d_b = \frac{1}{\frac{P_t}{P_s} - 0,346}$$

c.q.d.

7.5.1.2 Relação entre a umidade da madeira no ponto de máxima saturação e sua densidade básica.

A. Sabe-se que:

$$V_t = V_a + V_m$$

B. Dividindo-se ambos os termos da equação do ítem A. por

P_s , ela não se altera matematicamente.

$$\frac{V_t}{P_s} = \frac{V_a}{P_s} + \frac{V_m}{P_s}$$

C. Tem-se que

$$\frac{V_t}{P_s} = \frac{1}{d_b} \quad (\text{I})$$

$$\frac{V_a}{P_s} = \frac{P_a}{P_s} = U \quad (\text{II})$$

onde U é a umidade da madeira, expressa sobre madeira absolutamente seca.

$$\frac{V_m}{P_s} = \frac{1}{d_m} \quad (\text{III})$$

onde d_m é a densidade da substância madeira, igual a 1,53.

D. A equação do item B ficará transformada em:

$$\frac{1}{d_b} = U + \frac{1}{1,53}$$

$$\frac{1}{d_b} = U + 0,654$$

E. Seja

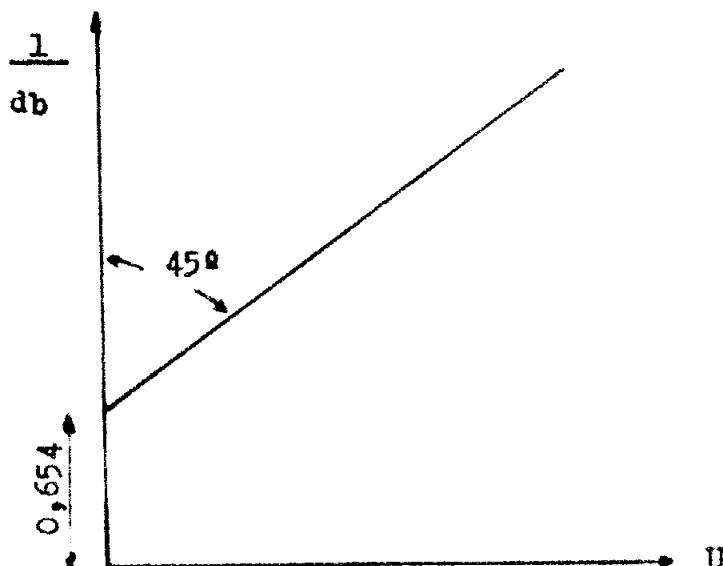
$$\frac{1}{d_b} = y$$

F. A equação linear

$$y = U + 0,654$$

relaciona a umidade da madeira no seu ponto de máxima saturação com o inverso da densidade básica.

G. Graficamente



H. Conclui-se que, conforme o teor de máxima umidade da madeira decresce, a densidade básica aumenta até atingir um ponto máximo, quando $U = 0$. Nesse ponto $\frac{1}{d_b} = 0,654$ e $d_b = 1,53$, ou seja, a densidade básica igualar-se-ia à densidade da substância madeira. Para que isso acontecesse, não deveria existir nenhum vazio na madeira que pudesse ser ocupado por água.

A madeira deveria ser então uma substância totalmente sólida e desprovida de vazios.

7.5.2 O método da balança hidrostática

Este método consiste na utilização de uma ba

lança hidrostática para se determinar o volume verde da madeira.

A expressão para o cálculo da densidade básica é a seguinte:

$$d_b = \frac{P_{as}}{P_u - P_i}$$

onde

P_{as} = peso absolutamente seco

P_u = peso úmido da madeira verde

P_i = peso imerso em água da madeira verde

8. CONÍFERAS (Gymnospermae) E FOLHOSAS (Angiospermas) NA FABRICAÇÃO DE CELULOSE E PAPEL

8.1 Introdução

Embora representando 50 % da área florestal que recobre o globo, as folhosas por muito tempo foram deixadas em segundo plano pelos produtores de papel. Este desinteresse decorria do fato destas espécies não ocorrerem em maciços puros, de muitas delas absorverem água com grande facilidade impedindo o transporte fluvial, de apresentarem densidades geralmente elevadas e, principalmente por apresentarem menor comprimento de fibra pois importância especial foi dada a esta dimensão da fibra durante muitos anos. Era conceito difundido que a resistência do papel estava associada unicamente ao comprimento das fibras. A partir de 1960 passou-se a observar que outras características da madeira influenciam de maneira complexa muitos aspectos da produção do papel.

O grande desenvolvimento que vem sofrendo nos últimos anos a indústria papreira passou a pressioná-la no sentido de se obter mais e de forma mais barata, as matérias-primas vegetais indispensáveis ao seu funcionamento. O sucesso alcançado pelas espécies do gênero Eucalyptus na produção de papel e celulose em países mediterrânicos, latino-americanos e na Austrália contribuiu decisivamente para a quebra do errôneo conceito que só de coníferas se obtinha papel de boa qualidade. Além das considerações sobre as características anatômicas das madeiras, o fator econômico muito contribuiu para o aumento da utilização das folhosas pela indústria de celulose. A madeira de coníferas custa pelo menos 20% e às vezes 50% mais que a de folhosas.

Todas estas observações não querem significar porém que a utilização de madeira de folhosas para produção de celulose seja recente. Em 1853, um processo para transformar madeira de bétula em celulose foi patenteado na Inglaterra. No ano seguinte, a primeira fábrica comercial usando o álamo como matéria-prima foi fundada na América. Celulose de eucalipto também foi produzida com sucesso há mais de meio século, tendo sido estabelecida em Portugal a primeira fábrica.

8.2 Vantagens das folhosas para produção de celulose

Serão enumeradas aqui, algumas das propriedades em que as folhosas são superiores às coníferas, e a seguir aquelas em que são inferiores. A exposição das vantagens e desvantagens conduzirá naturalmente ao estudo da viabilidade da mistura dos dois tipos de celulose, na qual poderão ser combinadas as propriedades desejáveis de ambas.

As vantagens das pastas de folhosas incluem as seguintes:

a. Fibras mais curtas oferecem melhor formação

O termo formação é usado na indústria papelreira para se referir às variações localizadas na densidade superficial da folha. Se um pedaço de papel é colocado contra a luz, variações na opacidade podem ser geralmente percebidas, indicando que diferentes quantidades de material obstruem a passagem da luz em determinadas áreas da folha. Esta aparência mosqueada se deve a uma floculação das fibras durante o processo de fabricação do papel, quando as fibras estão dispersas em água. As fibras mais longas emaranham-se mais facilmente uma nas outras e esse maior grau de floculação acarreta pior formação.

b. Fibras mais finas dão melhores propriedades superficiais

Em igualdade de condições, as fibras mais finas tendem a dar uma folha com superfície mais lisa.

c. Boas propriedades mecânicas

Fibras curtas podem produzir papéis com propriedades mecânicas muito boas. Alta resistência ao rasgo, porém, não pode ser conseguida com fibras curtas somente.

d. Menor resistência ao fluxo

As celulosas de fibras curtas, quando dispersas em água ou outros líquidos, mostram uma menor resistência ao fluxo que celulosas de fibras longas.

e. Menor teor de lignina na madeira

As folhosas normalmente contêm menos lignina que coníferas (valores médios de 22 e 29% respectivamente). Como o teor de celulose é quase o mesmo para folhosas e coníferas, a diferença no teor de lignina é compensada pelo teor mais elevado de hemiceluloses nas folhosas (ao redor de 35%) contra aproximadamente 28% para coníferas). O menor teor de lignina pode resultar num consumo menor de produtos químicos durante o cozimento e em tempos mais curtos de digestão.

f. Maior teor de hemiceluloses

As hemiceluloses são constituintes desejáveis nas celuloses, do ponto de vista de aumentar o rendimento e pelos efeitos benéficos na ligação interfibras e na resistência da celulose.

8.3 Desvantagens das folhosas para produção de celulose

a. Menor resistência ao rasgo

O ensaio de rasgo é diferente da maioria dos ensaios das propriedades do papel, porque a carga é aplicada sobre uma área muito pequena, resultando em altas concentrações de pressão. No papel as fibras mais longas distribuem a carga mais efetivamente que as fibras curtas. Um traqueído, tendo comprimento maior, necessita de uma força maior para arrancá-lo do resto da estrutura da folha. Na prática a resistência ao rasgo das celuloses de folhosas pode ser elevada pela incorporação de fibras longas de coníferas.

b. Resistência ao dobramento

O comprimento de fibra tem influência direta na resistência ao dobramento, principalmente a baixos graus de moagem. Sob estas condições, a um mesmo grau de refinação, as celuloses de coníferas podem apresentar resistências ao dobramento de 10 a 15 vezes maiores que as de folhosas. Com o prolongamento da refinação, as ligações interfibras aumentam, provocando uma elevação na resistência ao dobramento. Nestas condições pode-se obter alta resistência ao dobramento mesmo para celulose de fibras curtas.

c. Menor resistência da folha úmida

A importância da resistência da folha úmida na fabricação do papel reside na relação que ela mantém para a velocidade na qual a máquina pode correr sem que haja quebras frequentes na parte úmida.

d. Impressão

A presença de vasos em folhosas pode ser prejudicial quando forem obtidos papéis de impressão a partir de madeira das mesmas: fragmentos de vasos podem tender a se levantar da superfície da folha durante a operação da impressão.

e. Efeitos da refinação

A refinação das fibras de celulose produz numerosos efeitos primários, entre eles o desfibrilamento (afrouxamento da estrutura fibrosa) e cortes transversais das fibras. O desfibrilamento facilita a ligação entre as fibras e o corte, por diminuir o comprimento médio das fibras, leva a uma melhor formação. Com celuloses de fibras curtas deve-se mini

mizar a ação de corte, enquanto que com fibras longas o encurtamento pode ser desejável para melhorar a formação.

9. RELAÇÕES ENTRE CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA E PROPRIEDADES DA CELULOSE E PAPEL

9.1 Introdução

O estudo das relações entre as características da madeira e as propriedades da celulose correspondente têm sido motivo de intensa pesquisa nos últimos 50 anos. Muitos dos resultados obtidos pelos inúmeros pesquisadores que se dedicam a este campo são conflitantes. A maioria das conclusões dos primeiros pesquisadores indicam a densidade da madeira e o comprimento da fibra como os principais fatores afetando a qualidade da celulose. Atualmente, mais e mais ênfase se tem dado a medições mais sofisticadas e a relações entre algumas destas características.

O efeito das características da madeira nas propriedades do papel é importante em razão da heterogeneidade física das fibras na madeira. É sabido que as propriedades de um papel produzido de uma espécie de madeira variam bastante em relação a um papel similar obtido de outra espécie. É por isso que se torna importante conhecer quais os fatores inerentes à madeira que afetam as qualidades do papel.

Os vários fatores que influenciam a qualidade da celulose e papel podem ser classificados em:

a. anatômicos ou morfológicos

- comprimento da fibra

- largura da fibra
- espessura da parede celular
- relações entre as dimensões fundamentais

b. físicos

- densidade básica
- relação lenho inicial/lenho tardio
- teor de madeira juvenil
- teor de madeira de reação
- teor de nós

c. inerentes à própria fibra

- ângulo micelar ou fibrilar
- resistência da fibra individual
- densidade da parede celular

d. químicos

- teor de lignina
- teor de celulose
- teor de hemiceluloses
- teor de extrativos e cinzas

A diferenciação entre fibra da madeira e fibra de celulose é importante. O termo "fibra", como é geralmente designada a celulose, pasta ou polpa celulósica, engloba todo e qualquer tipo de célula lenhosa na mesma. A maioria destas células são traqueídeos, no caso de coníferas, e fibras libriformes, fibro-traqueídeos, elementos de vaso e células parenquimatosas, no caso de folhosas.

Quando se considera a madeira como fonte de fibra, dois fatores devem ser considerados: rendimento em celulose e sua qualidade. O primeiro depende das características da ma-

deira antes do cozimento e do processo empregado na conversão enquanto o último depende das características anatômicas das fibras e das modificações ocorridas nelas devido ao processo de conversão. A qualidade desejada para a celulose depende do produto final. Assim as qualidades da fibra para produzir papel kraft resistente diferem daquelas para papel de impressão. Como existe grande variabilidade na madeira dentro e entre árvores da mesma espécie e entre espécies diferentes, é fácil obter-se as qualidades desejadas no produto final, alterando-se alguma destas variáveis ou trabalhando-se com misturas de celuloses. Desta forma, a disponibilidade de matéria-prima a preços convenientes torna-se muitas vezes mais importante que as características da madeira e as de suas células.

9.2 Fatores anatômicos e morfológicos

O papel pode ser definido como uma fina rede plana, constituída de fibras depositadas em vários ângulos. As fibras ao se inter cruzarem formam pontos de ligação que dão resistência ao papel. As características destas fibras, principais componentes do papel, são importantes para conferir ao mesmo as propriedades desejadas.

9.2.1 Comprimento da fibra

Há alguns anos atrás admitia-se o comprimento da fibra como a mais importante característica para a determinação das propriedades do papel, especialmente sua resistência. Atualmente tem-se reconhecido que muitas outras características da madeira apresentam fortes relações com a qualidade do papel. Entretanto, a importância do comprimento da fibra deve ser tomada em conta, principalmente porque inúmeros autores mostraram que as resistências dos papéis à tração, ao arrebem

tamento e no rasgo são altamente influenciadas por ele. Encontra-se na literatura os seguintes tipos de relação entre resistência e comprimento de fibra (CF):

$$\text{Resistência à tração} = k_1 \times (CF)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{Resistência ao arrebentamento} = k_2 \times (CF)$$

$$\text{Resistência ao rasgo} = k_3 \times (CF)^{\frac{3}{2}}$$

A relação entre comprimento de fibra e resistências à tração e ao arrebentamento é bem aceita entre os pesquisadores, enquanto que com a resistência ao rasgo ocorrem certas conflitâncias. Vários autores admitem que a resistência ao rasgo está intimamente relacionada com o comprimento de fibra enquanto outros postulam que a densidade da madeira é o principal fator, e o comprimento da fibra é de importância secundária.

A influência do comprimento da fibra na resistência do papel se explica considerando que com fibras longas há menor possibilidade que estas se separem da estrutura do papel quando se submete o mesmo a um esforço. Há autores que apontam uma maior capacidade de desfibrilamento às fibras longas, aumentando assim a possibilidade de ligações entre fibras.

9.2.2 Largura da fibra

É uma das características cuja relação com a qualidade da celulose é mais obscura. De forma geral parece que a largura da fibra não exerce influência nas propriedades da celulose. Alguns autores, entretanto, admitem uma correlação negativa entre largura da fibra e resistência ao arrebentamento: o aumento em largura da fibra resulta numa diminuição da

resistência ao arrebentamento.

9.2.3 Espessura da parede celular

A espessura da parede celular é um dos fatores que mais se relaciona com a resistência da celulose. Por outro lado, como fibras com paredes mais espessas possuem maior teor relativo de celulose que fibras de paredes delgadas, existe também uma correlação positiva entre a espessura da parede celular e o rendimento em produção de celulose.

Se uma parede celular é espessa, a fibra tenderá a manter a sua forma original na folha de papel. As fibras com paredes delgadas sofrem colapso devido à ação de forças de compressão na fabricação do papel, e adquirem a forma de fitas.

As fibras tubulares na estrutura do papel não se ajustam perfeitamente, dando origem a papéis pouco densos, de baixa resistência à tração e ao arrebentamento e com alta opacidade.

As fibras de paredes delgadas formam folhas mais densas e devido sua maior flexibilidade, ocorre maior ligação entre as fibras. Isso conduz a papéis com maior resistência à tração e ao arrebentamento e menor opacidade.

A resistência ao rasgo mantém uma relação altamente positiva com a espessura da parede celular. Fibras de paredes espessas produzem papéis de alta resistência ao rasgo.

9.2.4 Relações entre as dimensões fundamentais das fibras

Atualmente, as relações entre as dimensões funda-

mentais das fibras têm sido reconhecidas como mais importantes, em certos casos, que as próprias dimensões tomadas isoladamente. Alguns índices foram criados e mostram-se de relativo valor na interpretação das qualidades da celulose.

9.2.4.1 Índice de enfiamento

É definido como a relação entre o comprimento e a largura da fibra.

Há muito tempo que esta relação é citada na literatura como um dos parâmetros associados com a resistência do papel, mas carece ainda de maior suporte tal afirmativa. Alguns autores notaram que esta relação não tem apreciável efeito nas propriedades do papel. Outros argumentam que é uma propriedade que não possui amplo espectro de variação, porque normalmente fibras mais longas são também mais largas. Existem, entretanto, algumas referências na literatura que associam esta relação com as resistências ao rasgo e ao arrebitamento. De forma geral, não se pode porém esperar que esta relação forneça informações básicas sobre as propriedades da celulose.

9.2.4.2 Coefficiente de flexibilidade

É expresso pela relação entre o diâmetro do lúmen e a largura da fibra, em porcentagem.

Quanto maior esta relação mais flexível se torna a fibra e ocorre assim maior possibilidade de ligações inter-fibras na fabricação da folha de papel. Com isso, aumentam-se as resistências à tração e ao arrebitamento e diminui-se a resistência ao rasgo (esta última, em certas condições).

9.2.4.3 Fração parede

É a relação percentual entre a espessura da parede celular e a metade da largura da fibra.

Em geral admite-se que quando a fração parede de um certo tipo de material fibroso é maior que 40%, este não fornecerá celulose de qualidade satisfatória. Isso porque as fibras serão extremamente rígidas, pouco flexíveis e haverá dificuldades na inter-ligação das mesmas. Esta relação mantém proporcionalidade positiva com a resistência ao rasgo e negativa com as resistências à tração, ao arrebitamento e com o peso específico aparente.

9.2.4.4 Índice de Runkel

É definido com a razão entre duas vezes a espessura da parede celular e o diâmetro do lúmen.

Runkel observou que as fibras de madeira, com o índice por ele desenvolvido menor que a unidade, produziam celuloses de boa qualidade, com boa capacidade de inter-ligação. Quando este índice era maior que a unidade as madeiras não eram satisfatórias para a produção de celulose de boa qualidade.

Inúmeras pesquisas mostraram que este índice guarda o mesmo tipo de relação com a qualidade da celulose que a espessura da parede celular e a fração parede.

9.3 Fatores físicos

9.3.1 Densidade da madeira

As variações na densidade da madeira afetam tanto o rendimento como a qualidade da celulose. Quando o rendimento é expresso em bases volumétricas (peso a.s. de celulose /volume de madeira), então a densidade da madeira é o mais importante fator para determinar o rendimento. O aumento da densidade da madeira promove aumento nos rendimentos bruto e depurado, teor de rejeitos e na resistência ao rasgo, enquanto diminui as resistências à tração e ao arrebatamento e o peso específico do papel.

Uma importante questão que se levanta é se todos os fatores que contribuem para elevar a densidade da madeira afetam as propriedades da celulose da mesma forma.

Outra consideração é o fato de muitas madeiras possuírem altos teores de extrativos, o que colabora para o aumento da sua densidade. Neste caso não há correspondência com o rendimento em celulose porque os extrativos são quase que totalmente removidos pelo processo de conversão a celulose. A densidade obtida com base na madeira livre de extrativos é então mais indicada para correlacionar-se com o rendimento em celulose.

9.3.2 Relação lenho inicial/lenho tardio

Nas espécies que possuem acentuadas diferenças entre os lenhos inicial e tardio, a relação entre estes dois componentes do anel de crescimento afeta tanto o rendimento como a qualidade da celulose.

Há muito tempo que se reconhece que as celuloses obtidas dos lenhos inicial e tardio possuem diferentes propriedades. Sabe-se que a madeira do lenho tardio possui fi-

bras com paredes mais espessas, maior densidade, maior teor de holocelulose e alfa-celulose e menor teor de lignina, em relação à madeira do lenho inicial. Estas características diferentes fazem com que a relação entre estes dois tipos de lenho seja importante na determinação das qualidades da celulose. Celuloses obtidas de madeira de lenho tardio mostram maior rendimento, alta resistência ao rasgo e baixas resistências à tração e ao arrebatamento, bem como baixo peso específico aparente. As celuloses obtidas de madeira de lenho inicial mostram características opostas.

A relação ótima entre lenho inicial e lenho tardio depende do uso do produto final.

9.3.3 Teor de madeira juvenil

Há muito tempo se sabe que a madeira que é formada nos primeiros anos da vida da árvore é diferente daquela que é formada mais tarde. A primeira é denominada madeira juvenil e a última madeira adulta. As características das madeiras juvenil e adulta da mesma árvore diferem sensivelmente. Madeira juvenil possui fibras curtas e de paredes delgadas, baixa densidade, altos teores de lignina e de madeira de reação.

Atualmente, em razão da crescente demanda de madeiras, mais e mais ênfase tem-se dado à produção de celulose a partir de madeira juvenil. Uma grande quantidade deste tipo de madeira é normalmente disponível nos primeiros desbastes em florestas de pináceas. A qualidade da celulose obtida de madeira juvenil é bastante diferente daquela de madeira adulta. Suas principais características são: baixo rendimento, altas resistências à tração e ao arrebatamento e baixa resistência ao rasgo.

9.3.4 Teor de madeira de reação

Madeira de reação, ou seja, madeira de compressão em coníferas e madeira de tensão em folhosas, é menos desejável que madeira normal para a fabricação de papel. Geralmente a presença destas madeiras anormais causam efeitos adversos no rendimento e resistência da celulose.

A madeira de compressão de coníferas, possuindo maior teor de lignina, requer cozimentos mais longos e apresenta dificuldades no branqueamento. A celulose apresenta sempre menor resistência que a normal.

A madeira de tensão de folhosas apresenta elevado teor de celulose e menores teores de lignina e pentosanas. Esta madeira é mais facilmente digerida e produz celulose química fácil de se branquear, mas extremamente fraca. Ela produz, porém, celulose para dissolução de alta qualidade.

9.3.5 Teor de nós

A quantidade de nós presente na madeira exerce efeito negativo na qualidade da celulose. Geralmente estes nós são difíceis de digerir e permanecem na celulose como rejeitos. Há desta forma um consumo de reagentes químicos que foi desperdiçado nos nós. Em virtude de suas fibras anormais, a resistência da celulose é diminuída pela presença de nós na madeira.

9.4 Fatores inerentes à própria fibra

9.4.1 Ângulo micelar ou fibrilar

É o ângulo formado entre o eixo longitudinal da

fibra e as microfibrilas de celulose da camada S_2 da parede secundária. Dentro de uma árvore, o ângulo micelar varia com o comprimento da fibra, sendo mínimo para as fibras mais longas. Em virtude desta correlação, o ângulo micelar é indicativo do comprimento da fibra e pode dar assim, alguma informação da parte da árvore de onde as fibras são originárias.

O ângulo micelar participa marcantemente na resistência da fibra individual. Existe uma relação bem definida entre ângulo micelar e resistência à tração da fibra: pequeno ângulo está correlacionado com alta resistência à tração. Uma relação inversa existe entre ângulo micelar e resistência ao dobramento: fibras de algodão com ângulo micelar bem aberto possuem resistência ao dobramento bem superior que fibras de rami, com ângulo muito pequeno.

9.4.2 Resistência da fibra individual

Evidentemente, constitui-se num problema bastante grande, a medição da resistência de cada fibra individualmente. Entretanto, já foi devidamente demonstrado que a resistência da fibra à tração na sua direção longitudinal contribui significativamente para as propriedades do papel. Atualmente admite-se que a resistência do papel depende da relação entre a resistência à tração das fibras individuais e a resistência ao cisalhamento das ligações inter-fibras. Uma quebra na folha de papel pode ser considerada como uma reação em cadeia, iniciada pela quebra da fibra ou ligação mais fraca. Esta quebra provoca uma distribuição adicional de forças nas fibras e ligações adjacentes, causando novas quebras, até que uma completa ruptura da folha tenha ocorrido.

9.4.3 Densidade da parede celular

Sabe-se que existem diferenças entre as densidades da parede celular para coníferas e folhosas. A influência desta característica nas propriedades da celulose não foi ainda bem investigada. Aparentemente, um aumento na densidade da parede celular tem mesmo efeito que um aumento na sua espessura.

9.5 Fatores químicos

Existem inúmeras evidências que as variações na composição química da madeira são menos importantes que as características morfológicas e físicas da madeira para se determinar a qualidade da celulose. Isto é particularmente aplicável às coníferas, onde a variação na composição química de suas madeiras não é considerável. Já no caso de folhosas, devido a grau de variabilidade de espécies, os teores de polissacarídeos e lignina, além dos extrativos e cinzas, variam muito mais, a ponto de algumas vezes limitarem a utilização de uma determinada espécie para produção de celulose.

Além disso, a literatura mundial é incapaz de fornecer informações sobre os níveis ideais dos constituintes da madeira que produziriam celuloses de melhores qualidades.

9.5.1 Teor de lignina

A lignina é um constituinte considerado indesejável para a produção de celuloses químicas. Durante as operações de cozimento e branqueamento a finalidade é removê-la o mais possível sem causar apreciável dano às fibras. Além da quantidade de lignina presente na madeira é importante se conhecer a sua distribuição na parede celular. Normalmente as madeiras de folhosas possuem menor teor de lignina que as coníferas e numa forma mais acessível na parede celular, local

lizando-se em sua maior proporção mais externamente na fibra.

A lignina que permanece na celulose após as operações de conversão colabora para que a fibra se torne mais rígida, resultando quando em altos teores, em papéis de baixa resistência e alta opacidade.

9.5.2 Teor de celulose

A celulose é o principal constituinte da pasta e é ela que determina a maioria das propriedades da celulose e papel. Exerce influência na resistência da fibra individual, nas ligações entre fibras e associada com as hemiceluloses determina as características da pasta celulósica quer em termos de rendimento e de resistência.

9.5.3 Teor de hemiceluloses

As hemiceluloses que permanecem na pasta após a deslignificação formam um gel na superfície das fibras e em seus espaços interfibrilares. Isso torna a fibra mais flexível, já que este gel atua como um lubrificante.

Em virtude de suas qualidades desejáveis, a maior parte dos processos de obtenção de celulose procura remover o mínimo possível de hemiceluloses.

9.5.4 Teor de extrativos

Os extrativos presentes na madeira são normalmente destruídos durante o processamento químico. Assim, altos teores de extrativos conduzem a baixos rendimentos em celulose. As quantidades de extrativos que permanecem na celulose não são muito pequenas e seus efeitos na qualidade da celulose

são insignificantes.

Existem entretanto certos tipos de extrativos em algumas pináceas que impedem a conversão destas madeiras por processos ácidos. Outro efeito indesejável que certos extrativos causam é a redução da alvura da celulose branqueada.

9.5.5 Teor de cinzas

O efeito do material inorgânico presente na madeira sobre a qualidade do papel é muito pouco estudado. Parte dos sais são solubilizados durante a conversão e outra parte permanece na celulose podendo-se complexar com compostos orgânicos, originando compostos cromatóforos que prejudicam a alvura da celulose branqueada.

10. GLOSSÁRIO DE ANATOMIA DE MADEIRA

Alburno

Camada externa do caule situada entre o cerne e a casca da árvore, composta de elementos celulares ativos e caracterizada por ter coloração clara, geralmente esbranquiçada (Sapwood).

Anéis de crescimento

Camadas concêntricas, facilmente observáveis na seção transversal, correspondentes à madeira produzida durante cada período de crescimento. Também chamados camadas de crescimento. (Annual rings, growth increments ou growth rings).

Angiospermas

Plantas que produzem sementes inclusas em óvário. Incluem a maioria das plantas que produzem sementes e todas as folhosas. (Angiosperms).

Camadas de crescimento

Ver anéis de crescimento.

Câmbio

Camada de células geradoras que dá origem ao xilema (para o interior) e floema (para o exterior). (Cambium).

Canais de resina

Conduitos ou espaços intercelulares geralmente servindo como depósitos de resinas, gomas, etc. (Resin canals ou resin ducts).

Casca

A parte mais externa do caule. (Bark).

Célula

Unidade anatômica dos vegetais. (Cell).

Cerne

Parte interna do caule envolvida pelo alburno, geralmente mais escura que este e constituída de elementos celulares já sem atividade vegetativa (Heartwood).

Coníferas

Árvores do grupo das Ginospermas. (Conifers e Softwoods).

Fibras

Elementos celulares longos, fusiformes e de paredes relativamente grossas, formando um tecido responsável pela maior ou menor resistência da madeira. (Fibers).

Floema

Principal tecido da condução das substâncias nutritivas nas plantas vasculares (partes internas da casca). (Phloem e inner bark).

Folhosas

Plantas do grupo das Angiospermas (Hardwoods).

Ginospermas

Plantas que possuem sementes nuas, isto é, não incluídas em ovários. Abrangem entre outras, as coníferas. (Gymnosperms).

Lenho

Conjunto de tecido vivo ou morto que constitui o caule da árvore (cerne e alburno). Equivale a madeira. (Wood)

Lúmen

Cavidade celular (Lumen).

Lenho inicial

Madeira produzida no início do ciclo vegetativo anual da planta. (Earlywood).

Lenho tardio

Madeira produzida no término do ciclo vegetativo anual da planta, isto é, quando a mesma se encontra em repouso aparente. (Latewood).

Medula

Região central e não fibrosa do caule. (Pith).

Parênquima

Tecido frouxo, em regra mais claro que a parte fibrosa do lenho por ser constituído de células curtas, iguais, de paredes finas. (Parenchyma).

Fontuação

Reentrância na parede secundária da célula (Pit)

Poros

Denominação usual da seção transversal de um vaso. Abundante entre as folhosas e não ocorre nas coníferas. (Porous).

Raios

Agregados de células parenquimatosas arrumadas no sentido radial em relação ao eixo da árvore. (Rays, ray cells, medullary rays).

Seção radial

Seção obtida pelo corte longitudinal e paralelo aos raios. (Radial section).

Seção tangencial

Seção obtida pelo corte longitudinal e perpendicular aos raios (Tangential section).

Seção transversal

Seção obtida pelo corte perpendicular ao eixo central da árvore. (Cross section).

Sistema monoclinico

É o sistema cristalográfico caracterizado por dois eixos oblíquos e um normal ao plano destes dois e todos os três desiguais em tamanho.

Traqueídos

Elementos celulares geralmente longos, peculiares às coníferas e com função que se equiparam às das fibras e vasos das folhosas. (Tracheids).

Vasos

Série vertical de células coalescentes que formam uma estrutura tubiforme de comprimento indeterminado, para transporte de seiva bruta nas folhosas. (Vessel).

Xilema

Conjunto de tecidos que formam os vasos lenhosos, fibras, raios e eventualmente parênquima. (Xylem).