

artigo técnico

relações entre características da madeira e propriedades da celulose e papel

CELSO EDMUNDO BOCHETTI FOELKEL
LUIZ ERNESTO GEORGE BARRICHELO

do Departamento de Silvicultura, Seção de Química, Celulose e Papel, da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo.

APRESENTAÇÃO

Em razão da heterogeneidade física das fibras na madeira, o efeito das características da madeira é descrito como um dos fatores mais importantes nas propriedades do papel.

Os autores destacam a importância de se conhecerem os vários fatores que influenciam a qualidade da celulose e papel. Assim, analisam cada um dos fatores para a sua determinação.

1. INTRODUÇÃO

O estudo das relações entre as características da madeira e as propriedades da celulose correspondente tem 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 presente 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 madeira 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.

2. FATORES ANATÔMICOS 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.

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

te porque inúmeros autores mostraram que as resistências dos papéis à tração, ao arrebentamento e ao rasgo são altamente influenciadas por ele. Encontra-se na literatura os seguintes tipos de relação entre resistência e comprimento de fibra (CF):

Resistência à tração =

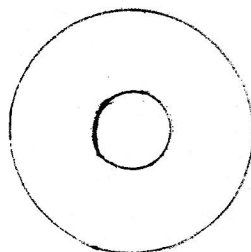
$$k_1 \times (CF) \frac{1}{2}$$

Resistência ao arrebentamento = $k_2 \times (CF)$

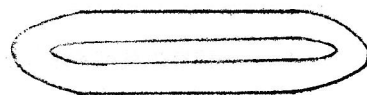
Resistência ao rasgo =

$$k_3 \times (CF) \frac{3}{2}$$

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.



fibra de parede espessa
(forma tubular)



fibra de parede delgada
após colapso (forma de
fita)

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.

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.

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 as 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.

2.4 Relações entre as dimensões fundamentais das fibras

Atualmente, as relações entre as dimensões fundamentais das fibras têm sido reconhecidas como a mais importante, 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.

2.4.1 Índice de enfiletramento

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 arrebatamento. De forma geral, não se pode porém esperar que esta relação forneça informações básicas sobre as propriedades da celulose.

2.4.2 Coeficiente 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 interfibras na fabricação da folha de papel. Com isso, aumenta-se as resistências à tração e ao arrebatamento e diminui-se a resistência ao rasgo (esta última, em certas condições).

2.4.3 Fração parede

É a relação porcentual 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 interligação das mesmas. Esta relação mantém proporcionalidade positiva com a resistência ao rasgo e negativa com as resistências à tração, ao arrebatamento e com o peso específico aparente.

2.4.4 Índice de Runkel

É definido como 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 interligação. 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.

3. FATORES FÍSICOS

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.

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 fibras 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.

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 dos 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 arrebentamento e baixa resistência ao rasgo.

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.

3. Teor de nós

A quantidade de nós presente na madeira exerce efeito negati-

vo na qualidade da celulose. Geralmente estes nós são difíceis de digerirem 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.

4. FATORES INERENTES À PRÓPRIA FIBRA

4.1. Ângulo micelar ou fibrilar

É o ângulo formado entre o eixo longitudinal da fibra e as microfibrilas de celulose da camada S₂ 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 varia com o comprimento da fibra e pode dar assim, alguma informação da parte da árvore de onde as fibras são originárias.

O ângulo micelar participa marcadamente 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.

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 cisalha-

mento das ligações interfibras. 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.

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.

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 grande 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.

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 possí-

vel 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, localizando-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.

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.

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.

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 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 de celuloses branqueadas.

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.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Barefoot, A. C.; Hitchings, R. G. & Ellwood, E. L. — **Tappi** 47(6):343-356, 1964.
2. Barefoot, A. C.; Hitchings, R. G. & Ellwood, E. L. — **Tappi** 49(4):137-146, 1966.
3. Barefoot, A. C.; Hitchings, R. G.; Ellwood, E. L. & Wilson, E. H. — **North Carolina**

Agricultural Experiment Station Tech. Bul. N.º 202, 88pp, 1970.

4. Byrd, V. L.; Elwood, E. L.; Hitchings, R. G. & Barefoot, A. C. — **Forest Products Journal** 15(8): 313-320, 1965.
5. Dadswell, H. E. & Wardrop, A. B. — **Appita** 13(5):161-173, 1960.
6. Dinwoodie, J. M. — **Tappi** 49(2):57-67, 1966.
7. Foelkel, C. E. B. — Em "Unbleached kraft pulp properties of some of the Brazilian and U. S. pines", tese de mestrado, SUNY College of Environmental Science and Forestry, 192pp, 1973.
8. Foelkel, C. E. B.; Diniz, A. S.; Garcia, W. & Ferreira, M. — "Estudo da influência da densidade da madeira nas propriedades das celuloses kraft de *Pinus Elliottii* obtidas a uma mesma condição de cozimento", Série Divulgação e Pesquisa TP-C/20, ESALQ-USP, 1974.
9. Jayme, G. — **Tappi** 41(11): 178A-180A, 1958.
10. Panshin, A. J. & de Zeeuw, C. — Em "Textbook of Wood Technology, Vol. I", McGraw-Hill Book Co., 3a. ed., 1970.
11. Sugden, E. A. N. — **Pulp and Paper Magazine of Canada**: T-273, T-279, junho, 1967.

