

artigo técnico

influência da densidade básica nas características de polpação de *p. elliottii* e *p. taeda*

S. L. B. BARROTTI
S. BUGAJER
R. CAHEN
G. S. S. KUAN
A. F. LIMA
O. F. SILVA

Centro Técnico em Celulose e Papel — Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de S. Paulo S/A

APRESENTAÇÃO

As influências das características da madeira na qualidade da pasta produzida é, freqüentemente, objeto de estudos e pesquisas.

Este trabalho objetiva mostrar o estudo de duas espécies de pinho, aclimatadas no Brasil,

e que são as espécies plantadas em maior quantidade: *pinus elliottii* e *pinus taeda*.

Usou-se estes dois tipos de madeira, com variações de idade, chegando-se à conclusão de que a idade influencia na densidade da madeira, do que decorre influências nas características de polpação e qualidade da pasta.

RESUMO

Pinus elliottii e *Pinus taeda*, aclimatados no Brasil, com idades variando entre 7-20 anos, foram submetidos a polpação kraft visando determinar as características de polpação em função da espécie e idade das árvores, assim como a qualidade da pasta celulósica obtida.

Observou-se que com o aumento da idade das árvores, a sua densidade básica aumenta sendo então esta propriedade utilizada como parâmetro de influência nas características de polpação e qualidade da pasta.

Para as duas espécies verificou-se que com o aumento da densidade básica diminui o teor de umidade dos cavacos, as dimensões médias das fibras aumentam, o tempo de cozimento para atingir um número kappa previamente estabelecido diminui, aumentando o rendimento em pasta celulósica, a densidade aparente das folhas manuais diminui, as resistências à tração e estouro diminuem e a resistência ao rasgo aumenta.

INTRODUÇÃO

Muitos estudos (1-7) foram de-

envolvidos, no exterior, com o intuito de determinar a influência das características da madeira na qualidade da pasta produzida. Os estudos foram realizados utilizando como matéria-prima madeiras de coníferas.

No período de 1966 a 1977 foram reflorestados, no Brasil, cerca de 2.880.200 ha, sendo que 33,3% destes são reflorestamentos de pinho (8).

Apesar disto pouca informação existe sobre as matérias-primas nacionais, principalmente sobre as coníferas.

Este trabalho teve por objetivo estudar duas espécies de pi-

no, *P. eliottii* e *P. taeda*, aclimatadas no Brasil, que são as espécies plantadas em maior quantidade.

Foram utilizadas árvores de várias idades oriundas da mesma região. Procurou-se determinar a variação das características físicas da madeira em função da espécie e da idade da árvore, e posteriormente a influência desta variação nas condições de polpação e qualidade da pasta celulósica obtida.

Com base nos resultados obtidos estabeleceu-se modelos matemáticos que pudessem orientar as indústrias de celulose e papel na seleção de espécies e/ou características da madeira para obter um produto final com as propriedades desejadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pinus eliottii e *Pinus taeda* da região de Santa Catarina com diferentes idades e plantados em dois locais diferentes, planalto e litoral, foram utilizados como matéria-prima para o estudo em questão.

A identificação das amostras quanto à idade e local de crescimento, assim como os resultados da determinação de densidade básica e teor de umidade das amostras encontram-se na tabela 1.

FIGURA 1
VARIÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA EM FUNÇÃO DA IDADE DA ÁRVORE

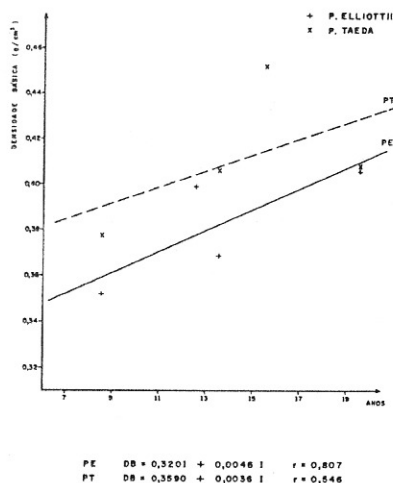


Tabela 1. Características físicas e de crescimento das madeiras

Amostra	Idade (anos)	Local de crescimento	Densidade básica (g/cm ³)	Teor de umidade (%)
<i>P. eliottii</i>				
1E	7-10	Planalto	0,352	62,6
2E	13-14	Planalto	0,369	61,1
3E	11-14	Litoral	0,399	59,1
4E	19-20	Planalto	0,407	59,0
5E	-	Litoral	0,423	57,5
<i>P. taeda</i>				
1T	7-10	Planalto	0,378	60,3
2T	13-14	Litoral	0,406	58,4
3T	19-20	Planalto	0,408	58,4
4T	15-16	Planalto	0,452	55,2

A figura 1^o mostra a variação da densidade básica com a idade da árvore, verificando-se que ocorre um aumento da densidade básica com o aumento da idade da árvore. O *Pinus taeda* apresentou densidade básica mais elevada que o *Pinus eliottii*. Os valores obtidos podem dar origem às seguintes retas:

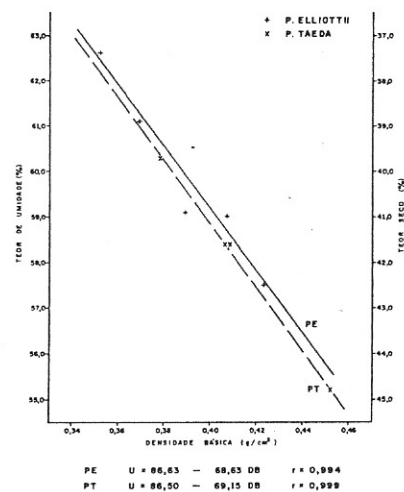
$$P. \text{ eliottii } DB = 0,3201 + 0,0046 I \text{ com } r = 0,807$$

$$P. \text{ taeda } DB = 0,3590 + 0,0036 I \text{ com } r = 0,546$$

Os coeficientes de correlação, principalmente no caso do *Pinus taeda*, são relativamente baixos, o que indica que para as mesmas espécies pode ocorrer variações naturais nas características da madeira (2).

A variação do teor de umidade da madeira com a densidade básica está graficamente ilustrada na figura 2. Com o aumento da densidade básica da madeira diminui a sua umidade. Aumentando a densidade da madeira, esta se torna menos porosa, o que diminui a acessibilidade da água, que se localiza nos espaços vazios. O *Pinus taeda* sendo mais denso que o *Pinus eliottii*, apresentou um teor de umidade ligeiramente inferior. Matematicamente podemos expressar estes resultados com as seguintes equações:

FIGURA 2
VARIÇÃO DO TEOR DE UMIDADE EM FUNÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA



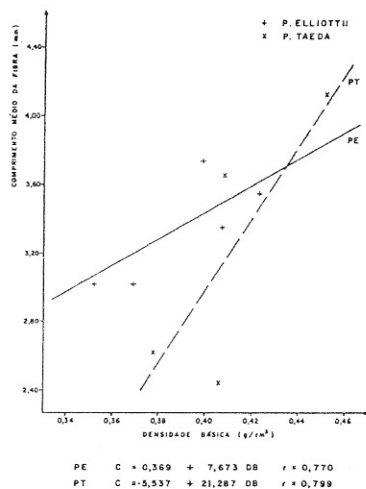
$$P. \text{ eliottii } U = 86,63 - 68,63 DB \text{ com } r = 0,994$$

$$P. \text{ taeda } U = 86,50 - 69,15 DB \text{ com } r = 0,999$$

As características morfológicas das amostras estudadas apresentaram os resultados indicados na tabela 2.

Na figura 3 encontra-se ilustrada a variação do comprimento médio das fibras em função da densidade básica. Pode-se verificar que com o aumento da densidade básica da madeira, o comprimento médio das fibras

FIGURA 3
VARIACÃO DO COMPRIMENTO MÉDIO DA FIBRA EM
FUNÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA

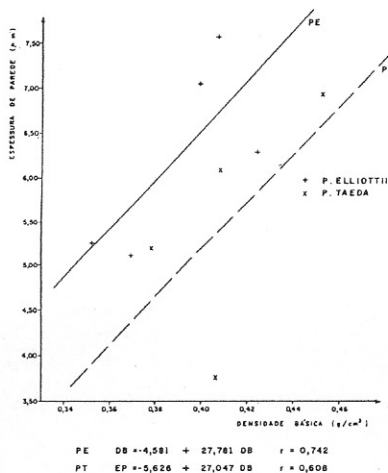


umenta. Para madeiras pouco densas (0,34 — 0,43 g/cm³) o Pinus elliottii apresenta fibras mais compridas que o Pinus taeda, o mesmo não ocorrendo para o caso de madeiras mais densas (acima de 0,43 g/cm³). As equações que expressam esta variação são as seguintes:

$$P. elliottii \ C = 0,369 + 7,675 \text{ DB com } r = 0,770$$

$$P. taeda \ C = -5,537 + 21,287 \text{ DB com } r = 0,799$$

FIGURA 4
VARIACÃO DA ESPESURA DE PAREDE DA FIBRA
EM FUNÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA



Como pode ser visto na figura 4, a espessura média das paredes das fibras aumentam com o aumento da densidade básica, sendo que as fibras do Pinus

Tabela 2. Características morfológicas das madeiras

Amostra	Dimensões médias das fibras				Relação entre as dimensões médias			
	comprimento	largura	espessura de parede	largura do lúmen	índice de enfieltamento	coeficiente de flexibilidade	fração de parede	índice de Kunkel
	C (mm)	D (µm)	EP (µm)	L (µm)	C/D	(L/D) x 100 (X)	(2EP/D) x 100 (X)	2EP/L
P.elliottii								
1E	3,09	46,29	5,25	35,54	66,75	76,78	22,68	0,30
2E	3,08	46,86	5,11	37,15	65,73	79,28	21,81	0,28
3E	3,74	47,30	7,05	32,64	79,07	69,01	29,81	0,43
4E	3,35	50,24	7,57	36,89	66,68	73,43	34,12	0,41
5E	3,55	49,11	6,29	37,01	72,29	75,36	25,62	0,34
P.taeda								
1T	2,62	43,00	5,19	32,63	60,93	75,88	24,14	0,32
2T	2,44	46,27	3,75	38,68	52,85	83,78	16,24	0,19
3T	3,66	44,48	6,09	32,31	85,96	72,64	27,38	0,38
4T	4,13	42,58	6,93	28,56	96,99	67,07	32,26	0,49

taeda apresentaram uma espessura de parede menor que as do Pinus elliottii. As retas que podem estimar a espessura da parede de fibras em função da densidade básica são as seguintes:

$$P. elliottii \ EP = -4,581 + 27,781 \text{ DB com } r = 0,742$$

$$P. taeda \ EP = -5,626 + 27,047 \text{ DB com } r = 0,608$$

As condições utilizadas para a polpação das várias amostras de Pinus elliottii e Pinus taeda, para obtenção de pastas celulósicas com número Kappa igual a 35, estão indicadas na tabela 3,

assim como a média e os intervalos de variação dos tempos de cozimento e dos rendimentos depurados de vários cozimentos efetuados para a mesma amostra. O Pinus taeda sendo mais denso que o Pinus elliottii necessitou um teor de álcali ativo ligeiramente mais elevado para a obtenção de pastas com o mesmo número Kappa.

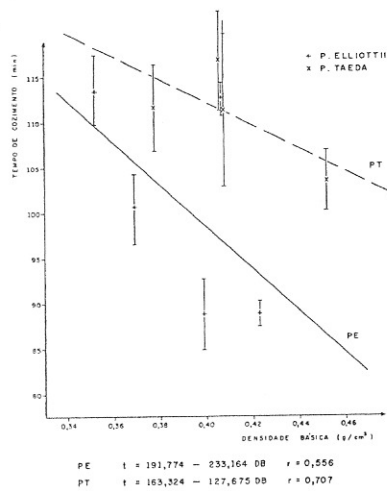
Na figura 5 encontra-se a variação do tempo de cozimento para obtenção de número Kappa igual a 35 em função da densidade básica. Podemos verificar que, para uma mesma espécie, o tempo à temperatura máxima de

Tabela 3. Características de polpação

Condições: Sulfidez: 28% sobre o álcali total titulável
Relação licor/madeira: 4/1
Temperatura máxima: 160°C
Tempo de aquecimento: 80 minutos
Número Kappa: 35 (pasta depurada)

Amostra	Álcali ativo (% em Na ₂ O)	Tempo a temp. máx. (min)	Rendimento em pasta depurada (%)
P.elliottii			
1E	15,00	113,5 ± 3,7	45,8 ± 1,1
2E	15,00	100,5 ± 3,8	46,3 ± 1,1
3E	15,00	88,8 ± 3,9	46,7 ± 0,8
4E	15,15	112,6 ± 1,8	42,5 ± 1,3
5E	15,00	88,8 ± 1,4	46,3 ± 1,2
P.taeda			
1T	16,00	116,6 ± 4,7	45,2 ± 0,6
2T	15,00	116,9 ± 5,5	44,0 ± 0,7
3T	15,60	111,4 ± 8,4	47,7 ± 0,9
4T	16,00	103,5 ± 3,3	48,5 ± 0,6

FIGURA 5
VARIACÃO DO TEMPO DE COZIMENTO EM FUNÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA



polpação ou deslignificação, visando um teor fixo de lignina residual na pasta, o tempo necessário para atingir este teor será menor, devendo também fornecer uma maior quantidade de pasta celulósica.

As expressões matemáticas que podem ser utilizadas para estimar o tempo de cozimento para as duas espécies, para atingir um número Kappa de 35, em função de sua densidade básica são as seguintes:

P. elliotii $t = 191,774 - 233,164 \text{ DB}$ com $r = 0,556$
P. taeda $t = 163,324 - 127,675 \text{ DB}$ com $r = 0,707$

Na figura 6 podemos verificar que o rendimento em pasta celulósica depurada aumenta com a densidade básica da madeira, o

cozimento diminui com o aumento da densidade básica. O Pinus taeda necessitou de um tempo de cozimento maior que para o Pinus elliotii para o mesmo número Kappa, pois sendo mais denso apresentou maior dificuldade de penetração e difusão do licor de cozimento. Quando mais densa a madeira de conífera, ela contém um maior teor de lenho maduro (5,6), que é constituído por um teor de celulose mais elevado, menor teor de hemiceluloses e menor teor de lignina (3, 4, 7). Portanto, aumentando a densidade da madeira, diminui o seu teor de lignina, e quando esta é submetida ao processo de

FIGURA 6
VARIACÃO DO RENDIMENTO EM PASTA DEPURADA EM FUNÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA

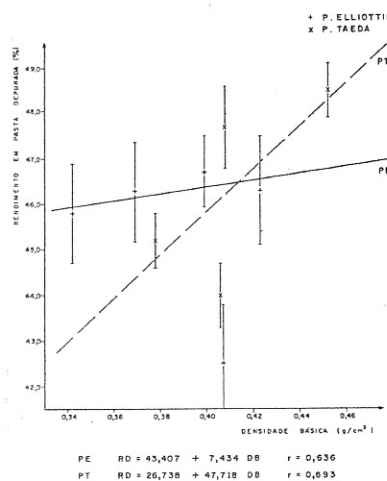


FIGURA 7
VARIACÃO DA DENSIDADE APARENTE DA PASTA EM FUNÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA

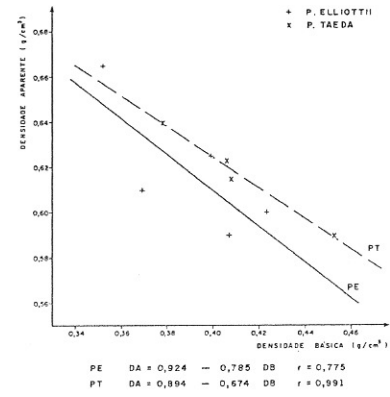


Tabela 4. Propriedades físicas das pastas celulósicas

Amostra	Grau de refinação (°SR)	Densidade aparente (g/cm ³)	Comprimento de auto-ruptura (m)	Fator de rasgo	Número de estouro
<u>P.elliottii</u>					
1E	16	0,435	2959	165,9	2,32
	30	0,631	8630	99,4	5,24
	48	0,660	8692	90,5	5,62
	67	0,679	10332	91,1	7,09
2E	15	0,460	3269	274,2	1,70
	26	0,597	7312	136,9	5,69
	40	0,602	7454	128,1	5,53
	60	0,653	10224	119,3	5,76
3E	15	0,413	2441	238,0	1,95
	38	0,605	7951	139,6	5,82
	57	0,636	9263	124,2	6,96
	79	0,674	8304	98,1	7,04
4E	14	0,417	2105	231,1	1,35
	36	0,572	8029	124,8	4,82
	55	0,614	7568	127,5	4,86
	73	0,634	8115	117,6	5,05
5E	16	0,427	2772	230,5	1,78
	35	0,580	6853	164,2	5,56
	44	0,594	7588	159,8	5,19
	67	0,623	8395	144,3	5,45
<u>P.taeda</u>					
1T	15	0,431	2909	189,8	1,90
	29	0,637	7065	99,7	6,23
	40	0,625	8930	99,8	6,67
2T	60	0,658	7639	98,1	6,49
	14	0,411	2847	174,6	1,75
	30	0,609	8679	129,9	5,82
3T	47	0,617	8455	129,9	5,12
	56	0,634	7240	126,7	5,11
	14	0,424	2382	267,6	1,06
4T	37	0,594	7999	104,1	4,75
	52	0,620	7918	101,6	4,76
	73	0,638	7586	94,4	5,49
5T	12	0,399	1934	196,6	1,45
	38	0,579	7644	161,2	5,56
	62	0,615	9394	141,9	5,58

que está de acordo com as observações acima mencionadas.

Os rendimentos depurados de pastas celulósicas com número Kappa 35 podem ser estimados em função da densidade básica da madeira através das seguintes expressões:

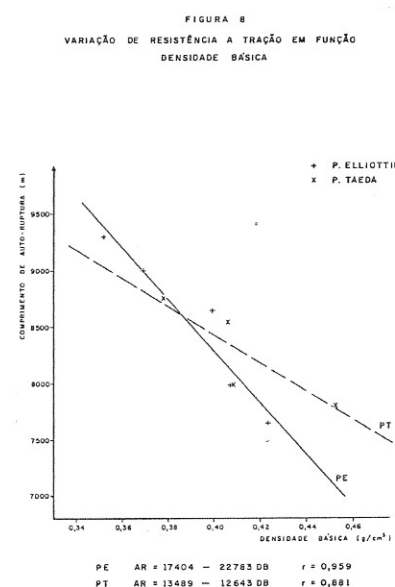
$$P. \text{elliottii} \text{ RD} = 43,407 + 7,434 \text{ DB com } r = 0,636$$

$$P. \text{taeda} \text{ RD} = 26,738 + 47,718 \text{ DB com } r = 0,693$$

Os valores das propriedades físicas das pastas obtidas encontram-se na tabela 4.

Para melhor comparar as propriedades físicas das pastas em função da densidade básica da madeira, foram obtidos valores a 45°SR, por interpolação gráfica, que se encontram na tabela 5.

A densidade aparente das folhas manuais diminui com o aumento da densidade básica da madeira, como pode ser visto na figura 7, o que está de acordo



com os dados de literatura (1, 2, 5, 6). A densidade aparente das folhas manuais de Pinus taeda foi mais elevada que a das folhas de Pinus elliottii. Matematicamente isto pode ser expresso pelas seguintes equações:

$$P. \text{elliottii} \text{ DA} = 0,924 - 0,785 \text{ DB com } r = 0,775$$

$$P. \text{taeda} \text{ DA} = 0,894 - 0,674 \text{ DB com } r = 0,991$$

Tabela 5. Propriedades físicas das pastas celulósicas valores estimados para 45°SR

Amostra	Densidade aparente (g/cm ³)	Comprimento de auto-ruptura (m)	Fator de rasgo	Número de estouro
P.elliottii				
1E	0,665	9300	91,0	7,09
2E	0,610	9000	125,0	5,70
3E	0,625	8650	131,0	6,50
4E	0,590	7995	124,0	4,90
5E	0,600	7650	157,5	5,50
P.taeda				
1T	0,640	8750	99,0	6,55
2T	0,623	8550	128,0	5,20
3T	0,615	8000	101,0	5,00
4T	0,590	7800	146,5	5,55

Na figura 8 pode-se observar que com aumento da densidade básica da madeira diminui a resistência à tração das folhas manuais (1-6). As expressões matemáticas que podem ser utilizadas para estimar o comprimento de auto-ruptura em função da densidade básica são as seguintes:

$$P. \text{elliottii} \text{ AR} = 17404 - 22783 \text{ DB com } r = 0,959$$

$$P. \text{taeda} \text{ AR} = 13489 - 12643 \text{ DB com } r = 0,881$$

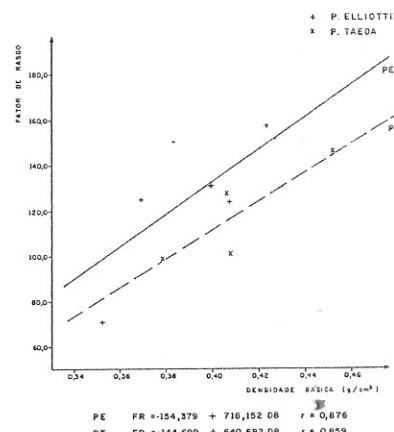
A resistência ao rasgo aumenta com o aumento da densidade básica, como mostra a figura 9, sendo que as folhas manuais de Pinus elliottii apresentaram valores mais elevados de resistência ao rasgo. As equações que expressam esta variação são as seguintes:

$$P. \text{elliottii} \text{ FR} = -154,379 + 718,152 \text{ DB } r = 0,876$$

$$P. \text{taeda} \text{ FR} = -144,699 + 640,692 \text{ DB } r = 0,859$$

A figura 10 mostra que a resistência ao estouro de folhas manuais diminui com o aumento da densidade básica, podendo esta variação ser expressa para as duas espécies pelas seguintes equações:

FIGURA 9
VARIACÃO DA RESISTÊNCIA AO RASGO EM FUNÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA

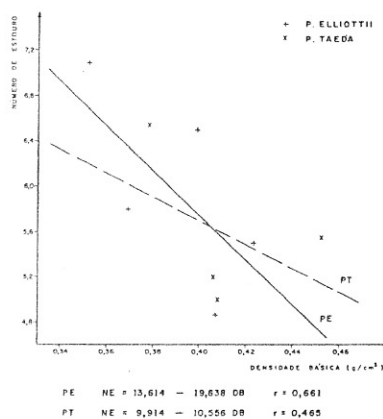


$$P. \text{elliottii} \text{ NE} = 13,614 - 19,683 \text{ DB com } r = 0,661$$

$$P. \text{taeda} \text{ NE} = 9,914 - 10,556 \text{ DB com } r = 0,469$$

As equações obtidas apresentaram em alguns casos correlações relativamente baixas, o que indica uma dispersão dos valores experimentais, portanto só devem ser usadas para obtenção de valores estimados, que podem ser utilizados como uma indicação na seleção de uma espécie com determinada densidade básica para produzir um produto com características desejadas.

FIGURA 10
VARIACÃO DA RESISTÊNCIA AO ESTOURO EM
FUNÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA



CONCLUSÕES

O *Pinus elliotii* e o *Pinus taeda* aclimatados no Brasil, apresentam características bastante similares às espécies cultivadas no sul dos Estados Unidos.

As duas espécies apresentam um comportamento semelhante.

A densidade básica da madeira aumenta com o aumento da idade da árvore.

Com relação ao aumento da densidade básica da madeira, podemos dizer o seguinte:

- o teor de umidade da madeira diminui
- as dimensões médias das fibras aumentam
- o rendimento em pasta celulósica aumenta, sendo que o tempo de cozimento para atingir o mesmo número Kappa diminui.
- a densidade aparente de folhas manuais, a resistência à tração e a resistência ao estouro diminuem, enquanto que a resistência ao rasgo aumenta.

PARTE EXPERIMENTAL

Amostras de *Pinus elliotii* e *Pinus taeda* da região de Santa Catarina com várias idades foram tiradas de plantações existentes em áreas do litoral e do planalto. Para cada uma das amostras foram retiradas cerca de vinte árvores, que foram des-

casadas e picadas industrialmente.

Com os cavacos, determinou-se a densidade básica segundo a norma ASTM-D 2395-69 Método G, e o teor de umidade dos mesmos.

Foram determinadas as características morfológicas das fibras da madeira, calculando-se posteriormente a relação entre as dimensões médias.

Os cavacos foram cozidos em digestor rotativo, aquecido eletricamente, com capacidade de 20 litros, marca Regmed. Utilizou-se um licor de cozimento com a seguinte composição em Na₂O:

NaOH: 67,30 g/l
 Na₂S: 33,60 g/l
 Na₂CO₃: 19,10 g/l
 Na₂SO₄: 4,37 g/l
 álcali ativo (AA): 100,90 g/l
 álcali total titulável (ATT): 120,00 g/l
 sulfidez: 28,00% (em relação ao ATT)

As condições de polpação utilizadas foram:

álcali ativo: 15-16%
 temperatura máxima: 160°C
 tempo até a temperatura máxima: 80 minutos
 relação licor/madeira: 4/1

Foram efetuados cozimentos visando-se obter uma pasta celulósica com número Kappa 35, variando-se apenas o tempo à temperatura máxima de cozimento. Para cada uma das amostras foram realizados cerca de 10 cozimentos.

As pastas obtidas foram lavadas, desintegradas em hidrapulper por 5 minutos e depuradas em peneira vibratória com 0,2 mm de ranhura, determinando-se:

- rendimento depurado
- rendimento total
- número Kappa (norma TAPPI T236 m-60)

Com os resultados obtidos para cada amostra foi calculada através de uma regressão linear a variação do tempo de cozimento e do rendimento depurado em função do número Kappa. Com as retas obtidas estimou-se os valores para número Kappa 35, calculando-se a variação para um nível de confiança de 95%.

Para a avaliação das propriedades físicas, as pastas celulósicas

de número Kappa próximo a 35, foram refinadas em moinho tipo Jokro, marca Regmed segundo o método de ensaio Merkblatt V/5/60. O grau de refinação Schopper Riegler foi determinado segundo a norma ABCP C10/73.

Foram feitas folhas de 60 g/m² em formador tipo Rapid Köethen, marca Regmed, de acordo com o método descrito na norma Merkblatt V/8/57.

As folhas foram condicionadas e ensaiadas a 65% de umidade relativa e 20°C, conforme a norma ABCP P4/70.

Foram executados os seguintes ensaios:

- gramatura (ABCP P6/70)
- espessura e densidade aparente (ABCP P5/77)
- resistência à tração (ABCP P7/70)
- resistência ao rasgo (ABCP P9/69)
- resistência ao estouro (ABCP P8/71)

GLOSSÁRIO DE SÍMBOLOS

PE = *Pinus elliotii*
 PT = *Pinus taeda*
 DB = densidade básica, g/cm³
 U = teor de umidade, %
 I = idade da árvore, anos
 r = coeficiente de correlação
 C = comprimento de fibra, mm
 t = tempo de cozimento, ou tempo à temperatura máxima, min.
 EP = espessura da parede da fibra, μm
 RD = rendimento em pasta depurada, %
 DA = densidade aparente, g/cm³
 A = comprimento de auto-ruptura, μm
 FR = fator de rasgo
 NE = número de estouro
 P. = pinus
 E = *elliottii*
 T = *taeda*
 D = largura de fibra, μm
 L = largura do lúmen da fibra, μm

BIBLIOGRAFIA CITADA

- Barefoot, A.C.; Hitchings, R.G.; Ellwood, E.L. — Tappi, Vol. 47, n.º 6 : 343 - 356 (June 1964)
- Barefoot, A.C.; Hitchings, R.G.; Ellwood, E.L.; Wilson, E.H. — The Relationship

- Between Loblolly Pine Fiber Morphology and Kraft Paper Properties — North Carolina Agricultural Experiment Station, Technical Bulletin n.º 202, Dec. 1970
3. Einspahr, D.W. — Tappi Vol. 59, n.º 10 : 53 - 56 (Oct. 1976)
 4. Kirk, D.G.; Breeman, L.G.; Zobel, B.J. — Tappi Vol. 55, n.º 11 : 1600 - 1604 (Nov. 1972)
 5. Koch, P. — Utilization of the Southern Pines Agriculture Handbook n.º 420 — U.S. Department of Agriculture Forest Service Southern Forest Experiment Station, 1972.
 6. Wangaard, F.F.; Kellogg, R.M.; Brinkley Jr. A.W. — Tappi, Vol. 49, n.º 6 : 263 - 277 (June 1966)
 7. Zobel, B. — Tappi, Vol. 59, n.º 4 : 126 - 128 (Ap. 1976)
 8. Prange, P.W. — Boletim Informativo, APFPC, Ano XI, n.º 127 (Jun. 1978)

AGRADECIMENTO

Agradecemos à Embrasca — Empreendimentos Florestais e Agrícolas Ltda. por ter permitido publicar parte dos resultados de suas pesquisas realizadas no CTCP.