

Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* para produção de celulose kraft através do Processo Lo-Solids®Mixtures of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* and *Pinus taeda* wood chips for kraft pulp production by Lo-Solids® processAna Gabriela Monnerat Carvalho Bassa¹, Francides Gomes da Silva Junior² e Vera M. Sacon³**Resumo**

Este estudo teve como objetivo verificar os efeitos de misturas de madeiras de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* na eficiência do processo Lo-Solids® e características das polpas celulósicas visando a diferenciação das propriedades dos papéis resultantes. Nas misturas de cavacos foram consideradas as proporções de 10% a 50% de *Pinus taeda*. Os resultados das análises indicaram uma tendência de queda dos rendimentos bruto e depurado e da viscosidade da polpa celulósica, dos teores de ácidos hexenurônicos, da solubilidade em NaOH 5%, do número de fibras por grama, da drenabilidade e do índice de tração e estouro, com o aumento da participação de *Pinus taeda* nas misturas. Em contrapartida, foram observadas tendências de aumento dos teores de lignina total na polpa, do comprimento e da largura das fibras, do coarseness, do índice de rasgo e do consumo específico de madeira à medida que a participação de *Pinus taeda* aumenta nas misturas. A adição de até 10% de fibra de *Pinus taeda* ao *Eucalyptus* pode melhorar a qualidade da polpa para os parâmetros índice de rasgo e drenabilidade. Plantas produtoras que desejam a produção de um tipo de celulose diferenciada, com elevada resistência ao rasgo, incremento da produção, ou ainda a produção de papéis especiais, de baixa gramatura, devem considerar a adição de pequenas proporções de *Pinus* ao *Eucalyptus*.

Palavras-chave: Misturas de madeira, Polpação Lo-solids®, *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Pinus taeda*, Testes físicos

Abstract

This paper is aiming to evaluate the possibility of cooking mixtures of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* and *Pinus taeda* for the production of kraft pulp with specific characteristics. Proportions of *Pinus taeda* from 10% to 50% were considered. The results indicated a downward trend in total yield and screened yield values, in pulp viscosity, in the hexenuronic acid content, in solubility in NaOH 5%, in the number of fibers per gram of pulp, in the drainability and strength and burst indices, with the increasing proportion of *Pinus taeda* in the pulps. As the proportion of *Pinus taeda* increased in the pulps an increase was noticed for the parameters total lignin content in the pulp, length and width of the fibers, coarseness and tear indices. In conclusion, the addition of up to 10% of *Pinus taeda* to *Eucalyptus* can increase pulp quality for the tear index and drainability parameters speeding up the paper machines and resulting in higher productivity. These mixtures also allow the production of tailor-made pulp and special papers.

Keywords: Mixtures of wood, Lo-solids® pulping, *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Pinus taeda*, Physical tests

INTRODUÇÃO

As principais fontes de matéria-prima para produção de celulose e papel no Brasil são oriundas de reflorestamentos com os gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, sendo a principal vantagem comparativa do Brasil, o desenvolvimento da celulose de fibra curta à base de eucalipto e a sua aceitação no mercado internacional.

Os híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* destacam-se no cenário florestal brasileiro, pelo crescimento rápido, com ciclos de corte entre 6 e 7 anos de idade e por um bom desempenho na produção de celulose e papel. Através de avanços tecnológicos na área de silvicultura e da seleção de populações, famílias e indivíduos superiores, alcançou-se uma elevada produção de madeira, em torno de 40 a 50 m³/

¹Pesquisadora da Votorantim Celulose e Papel – Rodovia Gal. Euryale de Jesus Zerbine – km 84 - Jacareí, SP – 12340-010 – E-mail: gabriela.monnerat@vcp.com.br

²Professor Adjunto do Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo – Caixa Postal 9 – Piracicaba, SP – 13400-970 – E-mail: fgomes@esalq.usp.br

³Gerente Técnica da Votorantim Celulose e Papel. Rodovia Gal. Euryale de Jesus Zerbine - Km 84 - Jacareí, SP - 12.340-010 - E-mail: vera.sacon@vcp.com.br

ha/ano, aliada à boa qualidade da madeira, com rendimentos em polpa celulósica entre 50% e 54% e densidade básica da madeira, em torno de 0,500 a 0,520g/cm³.

Os plantios de *Pinus* no Brasil apresentam crescimento volumétrico entre 20 e 30 m³/ha/ano e sua rotação é de cerca de 20 anos, sendo que desbastes são realizados nos plantios aos 8 e 14 anos de idade. A madeira nas idades de 8 e 14 anos é utilizada para produção de celulose e papel e a madeira originada do corte final, aos 20 anos de idade é utilizada para serraria e laminação. O rendimento em polpa celulósica do *Pinus*, quando se deseja produzir papéis branqueados é baixo, entre 40% e 45% e sua densidade básica, dependendo da idade, pode atingir de 0,300 a 0,400g/cm³.

Ao se comparar estes dois gêneros, ou mesmo dentro do mesmo gênero, notam-se diferenças marcantes e entre elas se destaca o comprimento das fibras. As fibras do gênero *Eucalyptus* apresentam um comprimento entre 0,5 e 1,5 mm. O *Pinus*, por sua vez, apresenta fibras longas (os traqueídes medem entre 3 e 6 mm de comprimento) e, conseqüentemente, dá origem a papéis com elevadas resistências físico-mecânicas, que além de proporcionarem características específicas ao papel, permitem maior velocidade nas máquinas de papel, devido à maior resistência da folha úmida e seca e à maior facilidade de drenagem. Uma maior resistência da folha úmida e seca e uma maior facilidade de drenagem podem representar maior eficiência na produção de papel e menores custos de produção.

Foelkel (1977) enumera algumas vantagens das polpas celulósicas de folhosas, como: melhor formação da folha, melhores propriedades superficiais (folha de superfície mais lisa), boas propriedades mecânicas, menor teor de lignina na madeira e maior teor de hemiceluloses. Como desvantagens das folhosas para produção de celulose citam-se: menor resistência ao rasgo, menor resistência da folha úmida e à presença de vasos, que pode ser prejudicial, pois fragmentos de vasos podem se levantar da superfície do papel durante a impressão.

Chen *et al.* (1978) citam que existem poucos trabalhos publicados sobre cozimentos de misturas de madeiras de fibra curta e fibra longa e mostram que a adição de cavacos de *Populus tremuloides* a cavacos de *Picea glauca* para produção de polpa kraft resultou em um acréscimo no rendimento depurado entre 2% a 4%, uma menor geração de rejeitos, pouco efeito no con-

sumo de álcali e uma melhor deslignificação.

Oliveira *et al.* (1981) estudou a produção de celulose kraft utilizando cozimento convencional a partir de misturas de cavacos de madeira de *Pinus strobus* var. *chiapensis* e *Eucalyptus urophylla* de origem híbrida nas proporções de 0%, 33%, 66% e 100% de *Pinus strobus*. Os resultados demonstraram que à medida que se aumentava o teor de madeira de *Pinus strobus* na mistura, o rendimento depurado diminuía sensivelmente. O aumento da proporção de cavacos de *Pinus strobus* levou ao aumento do número kappa. Com relação às propriedades físico-mecânicas, a percentagem de cavacos de *Pinus* na mistura exerceu efeito significativo sobre o processo de refino, sendo necessário maior consumo de energia.

As modificações do processo kraft deram origem a patentes de processo que genericamente são chamados de cozimentos modificados e, entre eles está o processo Lo-Solids® (SILVA JR. e McDONOUGH, 2002).

De acordo com Turner Jr. e Stromberg (1999), o processo Lo-solids® está fundamentado na distribuição da carga alcalina ao longo do processo, visando fundamentalmente minimizar a concentração de sólidos dissolvidos de madeira na deslignificação principal e residual, ao mesmo tempo em que são mantidas as condições necessárias para um cozimento modificado.

Neste estudo, verificou-se a viabilidade de produção de polpa celulósica kraft através do processo Lo-Solids® a partir da utilização conjunta de madeiras de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* nas proporções de 10% a 50% de *Pinus taeda*, objetivando a verificação das influências das características das matérias-primas no produto final.

MATERIAIS E MÉTODOS

Material

Para realização do estudo foram utilizadas uma amostra de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com 7 anos de idade proveniente de plantio comercial da Votorantim Celulose e Papel, localizado no Estado de São Paulo e uma amostra de *Pinus taeda* com 9 anos de idade proveniente de plantio comercial da Klabin, na região de Telêmaco Borba, Paraná.

Foram amostradas 10 árvores para cada material genético. As árvores abatidas foram seccionadas em toretes de 1 metro de comprimento nas alturas: base, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%

da altura comercial (até 6 cm de diâmetro). As toras coletadas foram transformadas em cavacos por meio de um picador de discos móvel da marca Demuth.

Métodos

Os métodos utilizados para determinação da densidade básica e da composição química da madeira estão descritos na Tabela 1.

O teor de holocelulose foi obtido por diferença através da equação:

$$\text{Holocelulose (\%)} = 100 - (\text{extrativos(\%)} + \text{lignina(\%)})$$

Os cozimentos Lo-solids® foram realizados em duplicata, em digestor de circulação forçada, modelo M&K – 609, com dois reatores individuais, sendo um reator utilizado para a polpação e o outro para a transferência do licor. Em cada polpação foram utilizados 1.000 g de cavacos absolutamente secos (a.s.).

As proporções de cavacos variaram de 10% a 50% de *Pinus taeda*, em mistura com o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, além dos cozimentos das espécies puras.

As condições de cozimento estão expressas nas Tabelas 2 e 3.

O número kappa a ser alcançado na polpa marrom variou proporcionalmente aos componentes do mix entre 18 ± 1 (100% *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*) e 26 ± 1 (*Pinus taeda*).

Após cada cozimento a polpa obtida foi lavada com água em excesso, centrifugada, desagregada e armazenada em sacos de polietileno sob refrigeração a $5^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Para cada cozimento foi determinado o rendimento bruto, o rendimento depurado e o teor de rejeitos (fenda de 0.2 mm). As polpas foram analisadas de acordo com os parâmetros descritos na Tabela 4.

Para o cálculo do consumo específico das misturas entre as espécies, a densidade básica de cada mistura foi estimada, com base em uma ponderação da densidade básica obtida para cada espécie individualmente e sua proporção utilizada na mistura.

Os valores obtidos neste trabalho foram analisados estatisticamente através de análise de regressão e ajustamento de equações aos valores observados. As equações foram geradas pelo programa estatístico Statgraphics, sendo que o melhor modelo para cada variável foi escolhido por meio das estatísticas de coeficiente de determinação (R^2).

Tabela 1. Métodos utilizados para determinação da densidade básica e da composição química da madeira.

Table 1. Wood density and chemical composition methods.

Análise	Normas
Densidade básica	Máximo teor de umidade (FOELKEL <i>et al.</i> , 1972)
Teor de extrativos totais	TAPPI T204
Teor de lignina	TAPPI T222

Tabela 2. Condições dos cozimentos: quantidade de cavacos, relação licor madeira, carga alcalina, sulfidez e fator H.

Table 2. Cooking conditions.

Parâmetro	Condição
Relação licor madeira	3,5 : 1
Álcali efetivo (%NaOH)	Variável entre 17,0 e 23,5%
Sulfidez	30,0%
Fator H	Variável entre 520 a 1500

Tabela 3. Tempo, temperatura e distribuição da carga alcalina nas fases do cozimento.

Table 3. Pulping time, temperature and alkali distribution.

Fases	Tempo (min.)	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Distribuição Carga Alcalina (%)
Pré-vaporização	15	100	-
Impregnação	30	120	50
1ª substituição	20	variável	30
Cozimento	90	variável	-
2ª substituição	15	variável	20
Cozimento	110	variável	-

Tabela 4. Normas utilizadas para as análises de: número kappa, viscosidade, teor de lignina na polpa, ácidos hexenurônicos, solubilidade em NaOH 5% - S5, dimensões de fibras e testes físicos-mecânicos e drenabilidade.

Table 4. Kappa number, viscosity, lignin content in the pulp, hexenuronic acid content, S5%, fiber dimensions and physical-mechanical tests methods.

Análise	Normas
Número kappa	TAPPI T236
Viscosidade	TAPPI T230
Teor de lignina na polpa	TAPPI T222
Ácidos hexenurônicos	Chai <i>et al.</i> (2001)
Solubilidade em NaOH 5%-S5	SCAN C2:61
Dimensões de fibras	Equipamento Fiber Quality Analyser (FQA),
Drenabilidade	SCAN-C 19:65.
Tração e alongamento	SCAN – P38:80
Rasgo	SCAN – P 11:96
Estouro	SCAN – P 24:77

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de densidade básica e composição química da madeira são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Densidade básica e composição química da madeira.

Table 5. Wood density and chemical composition of the wood.

Parâmetro	Tratamento	<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i>	<i>Pinus taeda</i>
Densidade básica (g/cm ³)		0,505	0,332
Lignina total (%)		28,54	31,18
Extrativos (%)		2,50	2,37
Holocelulose (%)		68,90	66,44

Os extrativos e a lignina são constituintes considerados como indesejáveis no processo de produção de celuloses químicas, sendo suas determinações, indicativos que podem propiciar indiretamente estimativas sobre rendimento de processo e consumo de reagentes durante a polpação (BASSA, 2002).

Na Tabela 6 são apresentados os resultados médios dos cozimentos Lo-solids®, o tss/odt gerado e o consumo específico de madeira.

Verifica-se que foram necessários teores distintos de álcali efetivo (NaOH%) e fator H, para atingir o número kappa proposto no estudo, de 18 ± 1 para o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e de 26 ± 1 para o *Pinus taeda*. O *Pinus taeda*, devido à natureza da sua lignina, além do maior teor de lignina na sua composição e suas características anatômicas, necessitou de uma carga de álcali efetivo de 23,5% e de um fator H de 1500, para atingir o número kappa proposto, de 26 ± 1 .

De acordo com Colodette (2001) a lignina ocorre na maioria das plantas, mas sua composição não é idêntica em todas elas. De fato, as ligninas isoladas de madeira de fibra longa e madeira de fibra curta possuem estruturas básicas muito diferentes entre elas. As ligninas do tipo guaiacil são encontradas em coníferas, enquanto ligninas do tipo guaiacil-siringil ocorrem em folhosas. Fergus e Goring (1969) citam que em madeiras de folhosas, a lignina é composta de unidades siringil e guaiacil com relações variadas, sendo que a lignina siringil apresenta maior reatividade em polpação Kraft do que a guaiacil.

O *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* apresentou rendimento em polpa celulósica superior ao *Pinus taeda*. O rendimento em polpa é uma característica de extrema importância em uma unidade industrial, pois tem efeito sobre a geração de sólidos, sobre o consumo específico de madeira e, conseqüentemente, sobre os custos de produção.

Os valores de viscosidade obtidos para o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* foram superiores aos obtidos para o *Pinus taeda*. Entretanto, estes são valores típicos para as espécies avaliadas. Os valores de viscosidade da celulose devem ser analisados com ressalvas, pois os nú-

meros kappa das polpas são bem diferentes.

O *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* apresenta um tss/odt menor quando comparado ao *Pinus taeda*. Essa diferença é devida à maior carga alcalina aplicada (maior teor de inorgânicos), e ao menor rendimento em polpa observado para o *Pinus taeda* (maior teor de sólidos orgânicos gerados).

Conforme os resultados de densidade básica da madeira e rendimento em polpa celulósica baixos, o *Pinus taeda* apresenta um valor de consumo específico de 7,0 m³/odt, enquanto o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* apresenta um consumo específico de madeira por tonelada de celulose significativamente menor, de 3,67m³/odt,

Na Tabela 6 é possível visualizar que o número kappa aumentou gradativamente, à medida que se adicionava *Pinus taeda* ao *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, resultando em números kappa entre 19,1 e 22,1. Isso se deve à estratégia adotada no trabalho, de aumentar gradativamente o número kappa das polpas celulósicas, visando preservar o rendimento em polpa das misturas.

A carga alcalina aumentou consideravelmente à medida que o *Pinus taeda* foi adicionado ao *Eucalyptus*, sendo que a mistura com 10% de *Pinus taeda* utilizou 19,3% de álcali efetivo, e a mistura com 50% de *Pinus taeda*, 21,3%. O Fator H, assim como o álcali efetivo, aumentou consideravelmente à medida que o *Pinus taeda* foi adicionado ao *Eucalyptus*, variando entre 970 a 1420.

A Tabela 7 apresenta um resumo da análise estatística dos resultados de polpação das misturas avaliadas nesse trabalho.

Na Figura 1 são apresentados os resultados de rendimento depurado obtidos no estudo.

Verifica-se, na Figura 1 uma queda acentuada no rendimento depurado à medida que se acrescenta *Pinus taeda* ao *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Para a mistura 90% de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com 10% de *Pinus taeda*, o rendimento depurado obtido foi de 51,3%, enquanto na mistura de 50% de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com 50% de *Pinus taeda* o rendimento depurado atingiu valores de 47,29%.

Tabela 6. Resultados médios dos cozimentos Lo-solids®.
Table 6. Results of Lo-solids® pulping.

% Pinus taeda	Álcali efetivo (%NaOH)	Fator H	Nº kappa	RB (%)	Teor de rejeitos (%)	RD (%)	Viscosidade cP	Tss/odt	Consumo específico de madeira (m³/odt)
0	17,0	520	17,9	54,23	0,01	54,21	93,2	1,13	3,67
10	19,3	970	19,1	51,35	0,03	51,30	46,0	1,29	4,02
20	20,5	1150	19,0	49,65	0,01	49,64	36,0	1,39	4,30
30	21,0	1190	20,3	48,90	0,02	48,88	35,1	1,44	4,54
40	21,0	1340	21,0	47,99	0,02	47,97	30,1	1,48	4,80
50	21,3	1420	22,1	47,31	0,01	47,29	32,5	1,52	5,07
100	23,5	1500	25,6	43,04	0	43,04	26,4	1,82	7,00

Onde: RB = rendimento bruto, RD = rendimento depurado, Tss/odt = teor de sólidos secos gerados por tonelada de celulose. Sulfidez = 30% para todos os tratamentos

Tabela 7. Resultados da análise estatística para os parâmetros avaliados na polpação Lo-solids®.
Table 7. Statistical analysis for pulping parameters, tss/odt and wood consumption.

Parâmetro	Anova	Modelo ajustado	a	b	R² (%)
Álcali efetivo (%NaOH)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	17,2533	0,625486	95,84
Fator H	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	543,614	125,563	98,99
Número kappa	Significativo	$Y = 1/(a + bx)$	0,05558	-0,00020	95,73
Rendimento bruto (%)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	54,2711	-0,98902	99,12
Teor de rejeitos (%)	Não significativo	-	-	-	-
Rendimento depurado (%)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	54,2459	-0,98842	99,08
Viscosidade cP	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	1353,63	-55,8436	89,90
tss/odt	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	1,12599	0,056742	99,13
Consumo específico (m³/t)	Significativo	$Y = a + bx$	3,7169	0,027357	99,52

Onde: y=parâmetro a ser estimado e x=% da matéria-prima na mistura

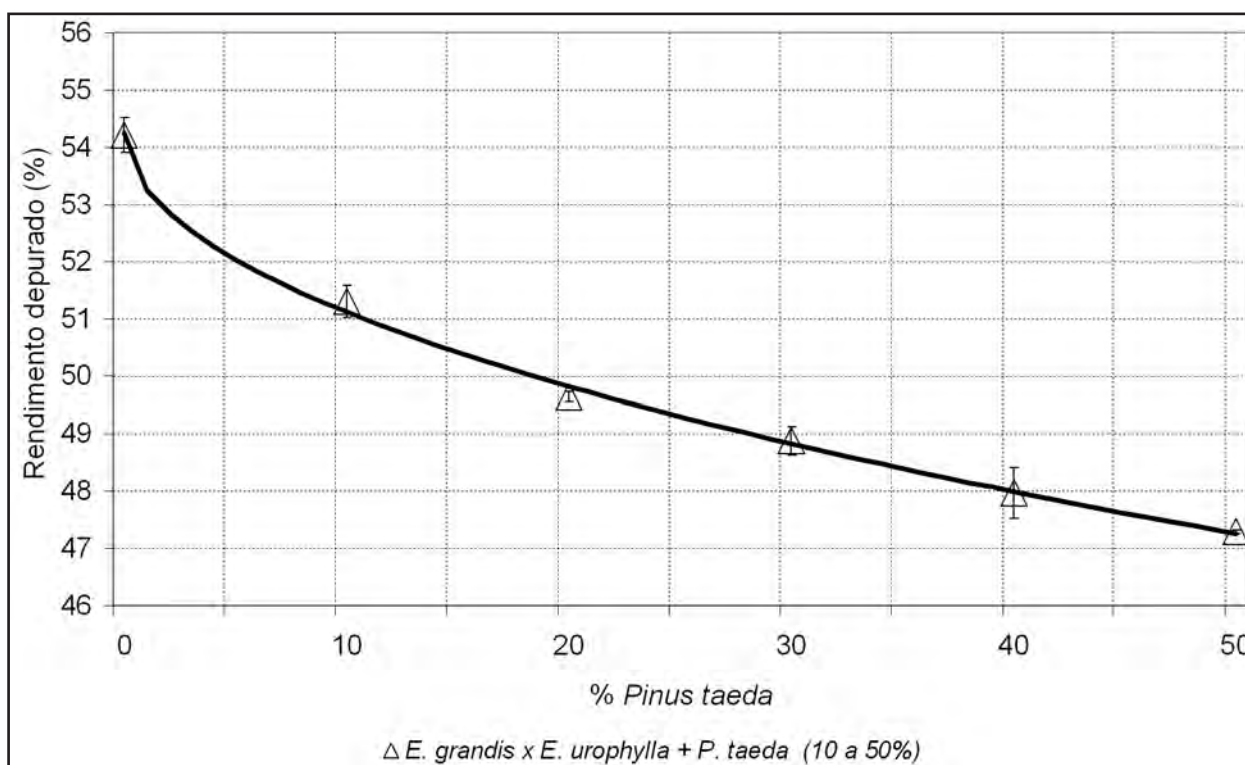


Figura 1. Rendimento depurado em função da proporção de *Pinus taeda* utilizada nas misturas.
Figure 1. Screened yield.

A partir dos resultados de rendimento observados, pode-se afirmar que, apesar das perdas verificadas para rendimento em polpa celulósica, é possível obter níveis aceitáveis de rendi-

mento ao misturar o *Pinus taeda* em pequenas proporções a espécies de eucalipto.

Para o parâmetro viscosidade, à medida que se acrescenta *Pinus taeda* na composição das

polpas celulósicas, observa-se uma tendência de queda. O valor de 46,0cP foi encontrado na mistura de 90% de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com 10% de *Pinus taeda* e o valor de 32,5cP foi obtido na mistura de 50% *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com 50% de *Pinus taeda*. Ressalta-se a diferença entre os números kappa das polpas celulósicas avaliadas.

Verifica-se pela Tabela 6 uma elevação dos valores de tss/odt com o acréscimo de *Pinus taeda* ao *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

Uma elevação do consumo específico de madeira é observada à medida que se acrescenta *Pinus taeda* ao *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, atingindo valores de até 5,07m³/odt para as misturas.

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, a adição de *Eucalyptus* ao *Pinus*, em unidades produtoras de polpa celulósica que utilizam 100% de *Pinus* como matéria-prima pode ser vantajosa. Como exemplo, a mistura de 50% de *Pinus taeda* com 50% de *Eucalyptus*, em relação ao 100% *Pinus* resultou em menor carga de álcali efetivo, menor fator H, maior rendimento em polpa celulósica e menor consumo específico de madeira.

Na Tabela 8 são apresentados os resultados obtidos nesse estudo, para teores de lignina total, ácidos hexenurônicos e a solubilidade em NaOH 5% (S5).

Tabela 8. Resultados médios de teores de: lignina total, ácidos hexenurônicos e solubilidade em NaOH 5% (S5).

Table 8. Lignin content in the pulp, hexenuronic acid content and S5% results.

% <i>Pinus taeda</i>	Lignina total (%)	Ácidos hexenurônicos (µmol/g)	S5 (%)
0	3,47	50,41	11,47
10	2,56	56,06	11,27
20	3,02	51,25	10,27
30	2,70	39,57	9,55
40	3,78	40,97	9,43
50	3,93	43,49	9,16
100	3,59	30,35	7,95

O *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* apresentou um teor de lignina total de 3,47%, valor próximo ao encontrado na polpa obtida

a partir do *Pinus taeda*, 3,59%. Entretanto, para atingir tais níveis de deslignificação, foram necessários distintos valores de álcali efetivo e de fator H. Esses fatos evidenciam a diferença qualitativa entre as ligninas de eucalipto e *Pinus*, pois para o *Pinus taeda* foi necessária maior energia química e térmica para a individualização das fibras, para um número kappa mais elevado.

Com relação ao teor de ácidos hexenurônicos, proporcionalmente pode-se dizer que a polpa de *Pinus taeda*, com 30,35µmol/g de ácidos hexenurônicos em sua composição, apresenta aproximadamente 40% menos ácidos hexenurônicos quando comparada com a polpa do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

Jiang *et al.* (2000) citam que a espécie de madeira influencia significativamente a quantidade de ácidos hexenurônicos formados, pois os teores de 4-O-metil-glicuranoxilanas variam entre as espécies. Em um experimento realizado pelos autores, isso é claramente demonstrado, uma vez que as polpas de fibra curta apresentaram 50% mais ácidos hexenurônicos que as de fibra longa, produzidas sob as mesmas condições de polpação kraft.

As hemiceluloses são importantes compostos químicos presentes na polpa final. A presença das mesmas, dentro de certos limites, aumenta a facilidade de refinação das fibras e melhoram também as propriedades físicas do papel. Verifica-se, na Tabela 8 que a polpa celulósica do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* apresenta maior teor de hemiceluloses, expressas pelo teor de S5, com 11,47%.

A Tabela 9 apresenta um resumo das análises estatísticas das características químicas das polpas celulósicas nesse trabalho.

Verifica-se que os valores de lignina total sofrem um acréscimo à medida que o *Pinus taeda* é adicionado ao *Eucalyptus*. O aumento do teor de lignina na polpa das misturas entre os *Eucalyptus* e o *Pinus taeda* pode ser justificada, em parte, pela estratégia utilizada no trabalho, de aumento progressivo do número kappa à medida que a proporção de *Pinus taeda* aumenta nas misturas.

Na Figura 2 pode-se visualizar o comportamento observado para teores de ácidos hexenurônicos.

Tabela 9. Resultados da análise estatística para teores de lignina, ácidos hexenurônicos e S5.

Table 9. Statistical analysis for lignin content in the pulp, hexenuronic acid content and S5%.

Parâmetro	Anova	Modelo ajustado	a	b	R ²
Lignina total (%)	Significativo	$Y = a + bx$	2,8381	0,0161429	22,62
Ac.Hexenurônico (µmol/g)	Significativo	$Y = a + bx$	53,6263	-0,256561	50,56
S5 (%)	Significativo	$Y = 1/(a + bx)$	0,086807	0,0004836	90,44

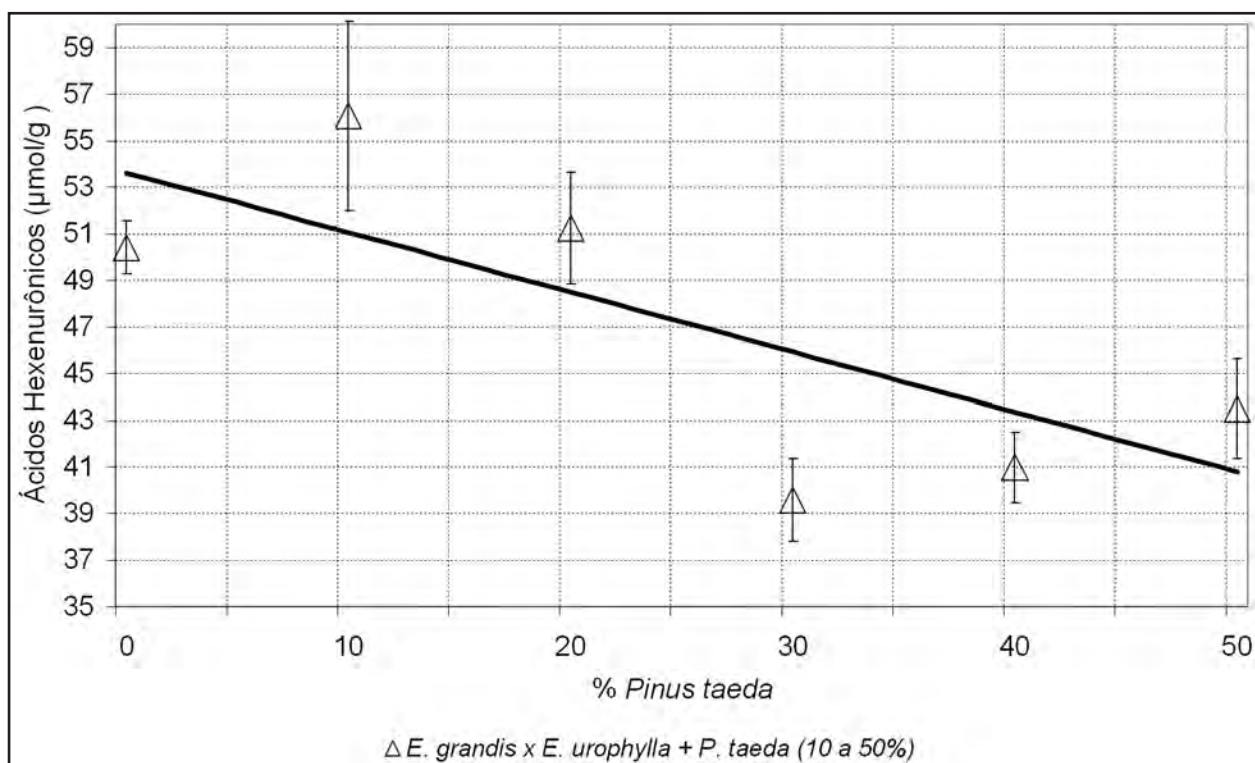


Figura 2. Teor de ácidos hexenurônicos em função da proporção de *Pinus taeda* utilizada nas misturas.
Figure 2. Hexenuronic acid content.

Nota-se que à medida que se acrescenta *Pinus taeda* aos *Eucalyptus*, o teor de ácidos hexenurônicos decresce. Esse resultado era esperado, em função dos valores obtidos para esse parâmetro, na avaliação das espécies puras.

Para S5, à medida que se acrescenta o *Pinus taeda* ao *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, verifica-se uma queda nos valores deste parâmetro. Justifica-se esse fato, novamente, pelo valor obtido nos materiais puros.

Foelkel e Barrichelo (1975) citam que a avaliação de uma madeira para produção de celulose deve levar em conta o número e o arranjo dos tecidos lenhosos constituintes, além de considerar o comprimento da fibra e a espessura da parede celular. O conhecimento das características anatômicas dos elementos fibrosos das polpas permite que sejam previstas indicações das propriedades de seus papéis.

Na Tabela 10 são apresentados os valores ob-

tidos para as características das fibras das polpas celulósicas.

Verifica-se que as dimensões das fibras do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* são inferiores às do *Pinus taeda*.

O coarseness da fibra, definido como a massa por unidade de comprimento, é uma propriedade fundamental que afeta as propriedades estruturais do papel (densidade, lisura, porosidade), resistências e propriedades ópticas. A flexibilidade da fibra e a capacidade de formação de ligações interfibras diminuem quando o coarseness aumenta (HORTAL, 1988). Este é influenciado pela espessura da parede da fibra e aumenta à medida que o comprimento da fibra aumenta. Ao avaliar o coarseness das polpas produzidas, encontraram-se os valores de 0,062, e 0,148mg/m, respectivamente, para as polpas produzidas a partir do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda*.

Tabela 10. Resultados médios dos parâmetros: comprimento e largura das fibras, teor de finos, coarseness e número de fibras/grama.

Table 10. Fiber dimensions results.

% <i>Pinus taeda</i>	Comprimento da fibra (mm)	Largura da fibra (µm)	Teor de finos (%)	Coarseness (mg/m)	Número de fibras/g x 10 ⁶
0	0,832	18,15	2,32	0,062	23,80
10	0,866	17,30	2,35	0,063	23,23
20	0,918	17,73	2,16	0,064	22,17
30	0,974	17,58	2,36	0,072	19,73
40	1,044	18,55	2,37	0,074	18,60
50	1,137	19,08	2,39	0,083	16,06
100	1,975	32,00	2,90	0,148	6,29

O número de fibras por unidade de massa é uma característica importante para as fibras curtas; tem impacto na formação do papel, na lisura superficial, na dispersão de luz / opacidade e na distribuição do tamanho dos poros. As propriedades que dependem do grau de ligação entre fibras, como densidade aparente e resistência à tração e ao estouro, geralmente mostram maiores índices nas polpas com mais fibras por grama. Isto comprova que esta característica proporciona mais pontos de contato, aumentando o número de ligações (SANTOS, 2002).

Observa-se grande variação para o parâmetro número de fibras por grama entre as polpas celulósicas avaliadas. A polpa produzida com o *Pinus taeda* apresenta o menor valor para esse parâmetro, $6,29 \times 10^6$ fibras/g, devido às maiores dimensões das fibras dessa espécie. A polpa produzida com o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* apresentou um valor de $23,8 \times 10^6$ fibras/g.

A Tabela 11 apresenta um resumo da análise estatística para características das fibras das polpas celulósicas das misturas avaliadas nesse trabalho.

Conforme a Tabela 11, para as misturas entre os *Eucalyptus* e o *Pinus taeda*, os valores de comprimento e largura da fibra aumentam à medida que se acrescenta o *Pinus* na mistura.

Na Figura 3 pode-se visualizar o comportamento observado para as misturas com relação ao coarseness.

O coarseness representa o peso (em mg) de 1 m de fibras dispostas de forma alinhadas. A Figura 3 mostra que à medida que se acrescenta *Pinus taeda* aos *Eucalyptus*, o coarseness aumenta. Esse resultado era esperado, pois, se está adicionando fibras mais largas e mais compridas, e, portanto mais pesadas, às fibras curtas dos *Eucalyptus*.

A Figura 4 apresenta o comportamento das misturas com relação ao número de fibras por grama.

Nota-se que à medida que se acrescenta *Pinus* ao *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* o número de fibras por grama apresenta uma tendência de queda. Como justificativa, ressalta-se a diferença no parâmetro em questão verificado nos materiais puros.

Tabela 11. Resultados da análise estatística para características das fibras.
Table 11. Statistical analysis for fiber dimensions results.

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Pinus taeda</i>					
Parâmetro	Anova	Modelo ajustado	a	b	R ² (%)
Comprimento (mm)	Significativo	$Y = 1/(a + bx)$	1,2139	-0,0064753	98,37
Largura (µm)	Significativo	$Y = a + bx$	17,475	0,0235	42,49
Teor de finos (%)	Não significativo	-	-	-	-
Coarseness (mg/m)	Significativo	$Y = 1/(a + bx)$	16,574	-0,0823864	88,97
Número de fibras/grama x 10 ⁶	Significativo	$Y = a + bx$	24,535	-0,157429	93,10

Onde: y=parâmetro a ser estimado e x=% da matéria-prima na mistura

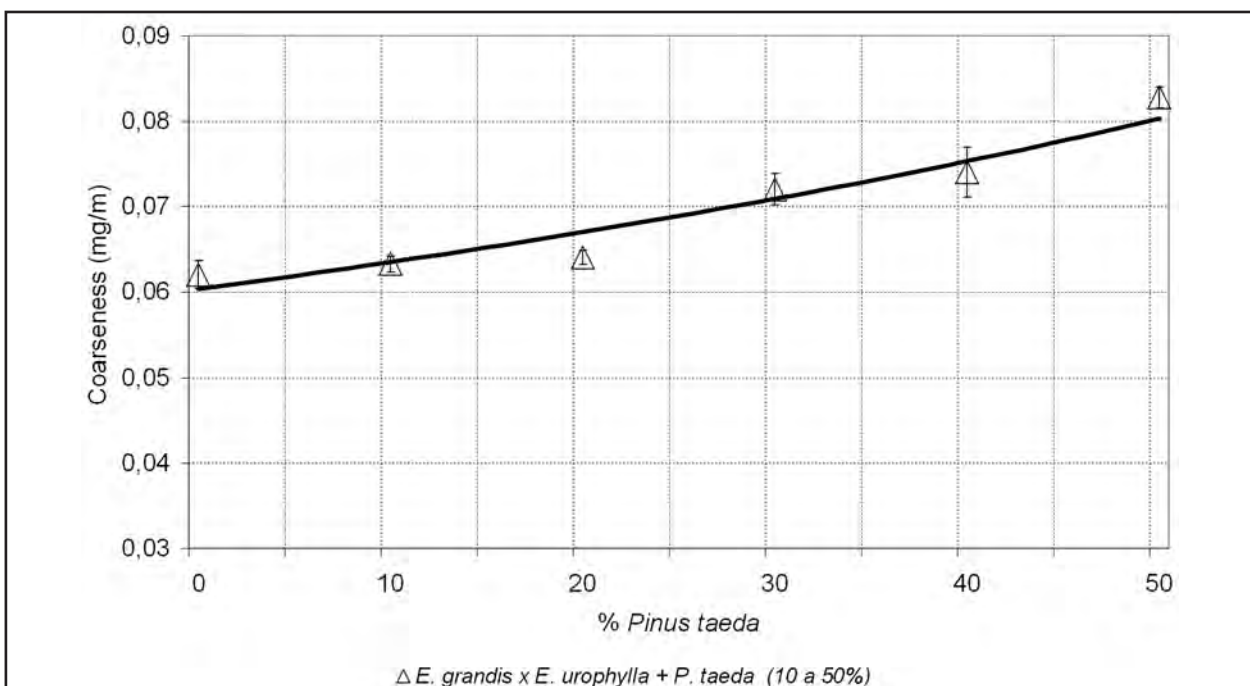


Figura 3. Coarseness em função da proporção de *Pinus taeda* utilizada nas misturas.
Figure 3. Coarseness according to the proportion of *Pinus taeda* in the mixtures.

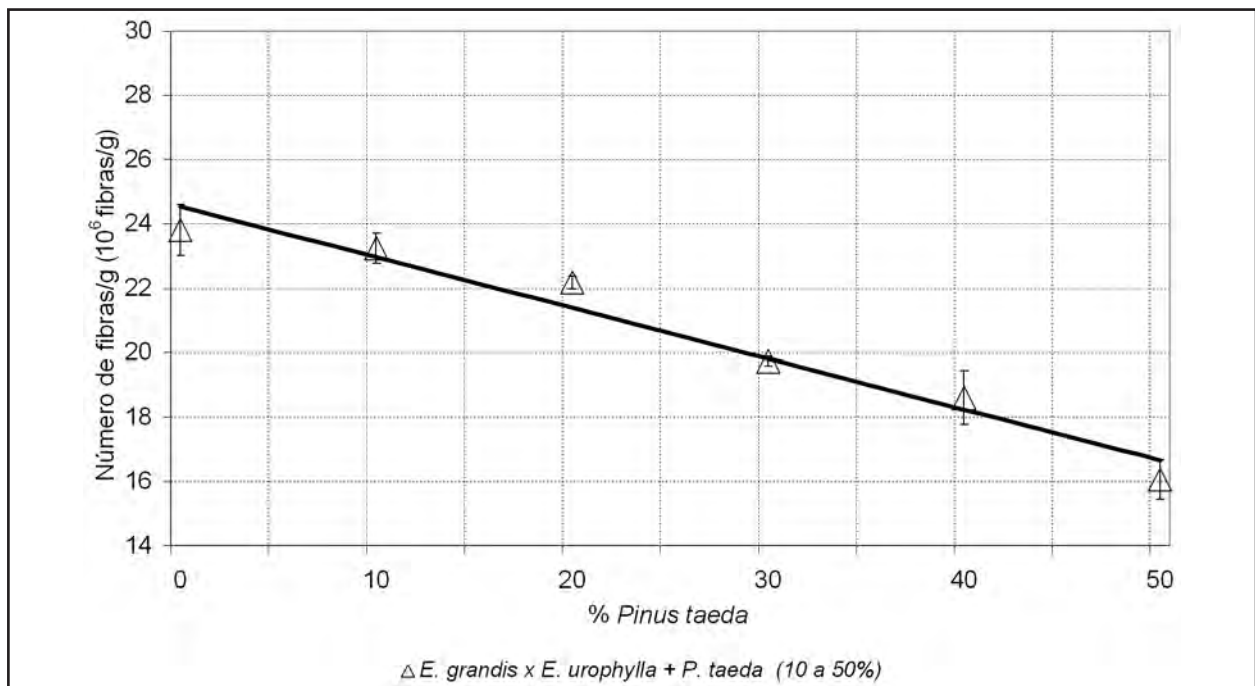


Figura 4. Número de fibras por grama em função da proporção de *Pinus taeda* utilizada nas misturas.
Figure 4. Number of fibres/g of pulp.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados obtidos para drenabilidade e testes físicos realizados nas polpas celulósicas não refinadas.

As hemiceluloses são hidrofílicas, amorfas e promovem a capacidade de absorção de água pelas fibras, enquanto o maior número de fibras por grama favorece um maior número de ligações interfibras, e conseqüentemente, tem-se uma elevação do °SR. O *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* apresenta uma solubilidade em NaOH 5% (S5) de 11,47%, e um número de fibras por grama de $23,8 \times 10^6$ fibras/g, fatores que podem contribuir para o valor de drenabilidade observado.

A polpa celulósica do *Pinus taeda* destaca-se com relação ao índice de rasgo, com 13,9mN.m²/g. A maior resistência ao rasgo observada para a polpa celulósica do *Pinus taeda* era esperada, devido ao maior comprimento da fibra desse material, quando comparada aos outros materiais avaliados neste trabalho.

O maior alongamento observado na pol-

pa celulósica de *Pinus taeda* pode ser explicado pelo maior comprimento da fibra que favorece a resistência ao alongamento em função da sua maior resistência individual.

A Tabela 13 apresenta um resumo da análise estatística dos resultados de drenabilidade e testes físicos das misturas avaliadas nesse trabalho.

O comportamento observado para o parâmetro drenabilidade está de acordo com os valores obtidos nos materiais puros, onde a polpa celulósica do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* apresentou uma drenabilidade de 23,8°SR e a do *Pinus taeda* de 14,8°SR; e com o comportamento verificado nas misturas entre as espécies, onde foi observada uma redução dos valores de solubilidade em NaOH 5% (S5) e de número de fibras por grama, com a maior proporção de *Pinus taeda* nas misturas, que ocasionam um menor número de ligações interfibras e menor capacidade de absorção de água e flexibilidade das fibras.

Os resultados de índice de rasgo podem ser visualizados na Figura 5.

Tabela 12. Resultados médios de drenabilidade e dos testes físicos efetuados nas polpas celulósicas não refinadas.
Table 12. Physical-mechanical tests and drainability results

% <i>Pinus taeda</i>	Drenabilidade (°SR)	Índice de tração (N.m/g)	Alongamento (%)	Índice de estouro (kPa.m ² /g)	Índice de rasgo (mN.m ² /g)
0	23,8	64,4	1,5	2,8	7,0
10	22,8	55,9	1,5	2,3	7,3
20	19,2	48,8	1,4	1,8	7,7
30	20,5	50,7	1,5	2,0	9,0
40	19,0	51,7	1,6	2,2	9,9
50	19,2	50,4	1,7	2,3	11,5
100	14,8	53,1	2,7	3,6	13,9

Tabela 13. Resultados da análise estatística dos testes físicos.

Table 13. Statistical analysis of physical-mechanical tests and drainability results.

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Pinus taeda</i>					
Parâmetro	Anova	Modelo ajustado	a	b	R ² (%)
Drenabilidade (°SR)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	23,8965	-0,712209	50,37
Alongamento (%)	Não significativo	-	-	-	-
Índice de rasgo (mNm ² /g)	Significativo	$Y = 1/(a + bx)$	0,148122	-0,0011771	88,55
Índice de tração (Nm/g)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	62,5322	-2,01259	74,90
Índice de estouro (kPam ² /g)	Não significativo	-	-	-	-

Onde: y=parâmetro a ser estimado e x=% da matéria-prima na mistura

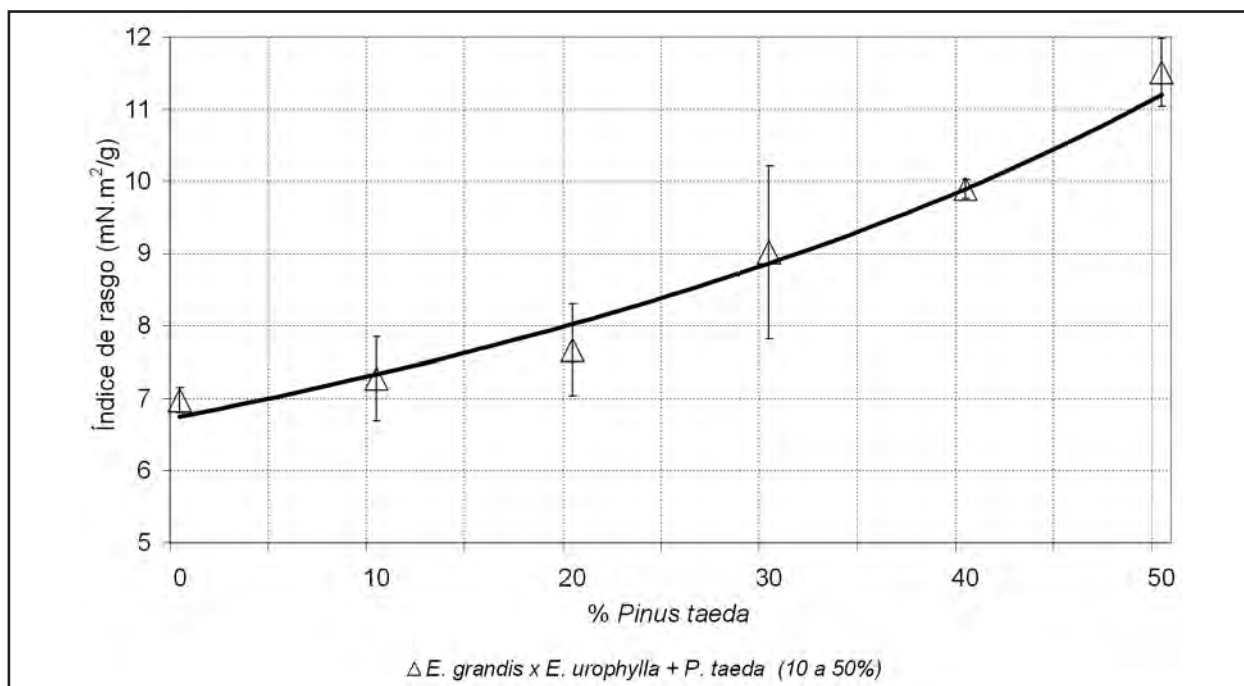


Figura 5. Índice de rasgo em função da proporção de *Pinus taeda* utilizada nas misturas.

Figure 5. Tear index according to the proportion of *Pinus taeda* in the mixtures.

A adição de 10% e 20% de *Pinus taeda* aos *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* promoveu respectivamente um incremento médio de 4,2% e 10% na resistência ao rasgo.

Observa-se uma queda dos valores de índice de tração nas misturas entre o *Eucalyptus* e o *Pinus taeda*, com o aumento da proporção de *Pinus taeda* nas misturas. Vale ressaltar que as misturas entre o *Eucalyptus* e o *Pinus taeda* apresentaram comportamentos de queda dos valores de solubilidade em NaOH 5% (S5) e de número de fibras por grama com o aumento da proporção de *Pinus taeda* nas misturas. Como consequência, pode-se supor que o número de ligações interfibras foi reduzido, e conseqüentemente, as resistências das polpas celulósicas sofreram um decréscimo.

O aumento da proporção de *Pinus taeda* ocasiona um decréscimo moderado e pouco significativo em termos industriais e de características de produto no índice de estouro das polpas celulósicas provenientes de misturas entre esta

espécie e o *Eucalyptus*. Novamente faz-se referência aos valores números de fibras por grama e solubilidade em NaOH 5% (S5), que decrescem para as misturas, com a adição de *Pinus taeda*. Esses fatores podem explicar o decréscimo da resistência ao estouro com a adição de *Pinus taeda* ao *Eucalyptus*.

CONCLUSÕES

A adição de 10% de fibra de *Pinus taeda* aos *Eucalyptus* pode melhorar a qualidade da polpa para os parâmetros índice de rasgo, com incrementos de até 8,4% e drenabilidade. Essas características permitem maiores velocidades de operação em máquinas secadoras de polpa celulósica e máquinas de papel e, conseqüentemente, conduzem a uma maior produção. Para esse nível de mistura ainda é possível obter rendimento em polpa celulósica próximo ou maior que 50% e assim, uma geração de sólidos e consumo específico satisfatórios.

A perda de rendimento em polpa celulósica observada pela adição de *Pinus taeda* aos *Eucalyptus*, em proporções maiores que 10%, pode inviabilizar o processo, pois, a redução no rendimento em polpa ocasionará um maior consumo de madeira e redução da capacidade de produção de uma unidade industrial.

A mistura de *Pinus taeda* com *Eucalyptus* seria favorável para unidades industriais que trabalham com 100% de *Pinus*, pois a substituição de cavacos de *Pinus* por cavacos de *Eucalyptus* é vantajosa, pelo ganho de rendimento em polpa celulósica, redução do consumo de madeira, ganho de produtividade da unidade industrial, economia de matéria-prima (madeira e álcali), entre outros.

Plantas produtoras que desejam a produção de um tipo de celulose diferenciada, com elevada resistência ao rasgo, incremento da produção em máquinas extratoras de celulose e/ou máquinas de papel, ou ainda a produção de papéis especiais, de baixa gramatura, devem considerar a adição de pequenas proporções de *Pinus* aos *Eucalyptus*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASSA, A. **Processos de polpação kraft convencional e modificado de madeiras de *E. grandis* e híbrido (*E. grandis* x *E. urophylla*)**. 2002. 103p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- CHAI, X-S.; ZHU, J.Y.; LI, J. A simple and rapid method to determine hexenuronic acid groups in chemical pulps. **Journal of Pulp and Paper Science**, Montreal, v.27, n.5, p.165-170, 2001.
- CHEN, R.; GARCEAU, J.J.; KOKTA, B.V. Hardwood mixed with softwood in kraft pulping. **Tappi**, Atlanta, v.61, n.7, p.35-38, 1978.
- COLODETTE, J.L. **Apostila de química da madeira do Curso de Pós-Graduação *Strictu Sensu* em Tecnologia de Celulose e Papel**. Viçosa: Universidade Federal de, 2001.
- FERGUS, B.J.; GORING, D.A. The topochemistry of delignification in kraft and neutral sulphite pulping of birch wood. **Pulp and Paper Magazine of Canada**, Montreal, v.19, p.314-320, 1969.
- FOELKEL, C.E.B. **Estrutura da madeira**. Belo Oriente: Cenibra, 1977. 84p.
- FOELKEL, C.E.B.; BARRICHELO, L.E.G. Madeiras de coníferas e folhosas na fabricação de celulose Kraft no Brasil e nos Estados Unidos da América, um estudo comparativo. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 8., 1975, São Paulo. **Trabalhos técnicos ...** São Paulo: ABCP, 1975. p.15-20.
- FOELKEL, C.E.B.; BRASIL, M.A.M.; BARRICHELO, L.E.G. Métodos para determinação da densidade básica para folhosas e coníferas. **O Papel**, São Paulo, v.33, n.8, p.57-61, 1972.
- HORTAL, J.G. Constituyents fibrosos de pastas y papeles. In: **Propriedades de las fibras celulósicas**. Terrassa: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Terrassa, 1998. cap.2, p.28-36.
- JIANG, Z.H.; VAN LIEROP, B.; BERRY, R. Hexenuronic acid groups in pulping and bleaching chemistry. **Tappi Journal**, Atlanta, v.83, n.1, p.167-175, 2000.
- OLIVEIRA, R.C.; FOELKEL, C.E.B.; GOMIDE, J.L. Misturas de madeiras de *Pinus strobus* var. *chiapensis* e *Eucalyptus urophylla* na polpação Kraft. **O Papel**, São Paulo, v.42, n.1, p.67-78, 1981.
- SANTOS, C.R. **Qualidade da madeira e sua influência nas características de papéis imprimir & escrever e tissue**. 2002. 45p. Monografia (Pós-Graduação *Latu Sensu* em Tecnologia de Celulose e Papel) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.
- SCAN TEST METHODS. Stockolm: Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee, 1998.
- SILVA JR., F.G.; McDONOUGH, T.J. Polpação Lo-solids® de eucalipto: efeito do ritmo de produção. **O Papel**, São Paulo, v.63, n.1, p.69-81, 2002.
- TAPPI - TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI tests methods**. Atlanta: TAPPI Press, 2006.
- TURNER JR., E.A.; STROMBERG, B. Maior rendimento da polpação de fibra curta pelo processo Lo-solids®. **O Papel**, São Paulo, v.60, n.1, p.52-55, 1999.

Recebido em 18/12/2006

Aceito para publicação em 25/07/2007

