

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*,  
*Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft  
através do Processo Lo-Solids®**

**Ana Gabriela Monnerat Carvalho Bassa**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Recursos Florestais, com opção em  
Tecnologia de Produtos Florestais

**Piracicaba  
2006**

Ana Gabriela Monnerat Carvalho Bassa  
Engenheiro Florestal

**Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* para produção de celulose kraft através do Processo Lo-Solids®**

Orientador:  
Prof. Dr. **FRANCIDES GOMES DA SILVA JÚNIOR**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Recursos Florestais, com opção em  
Tecnologia de Produtos Florestais

**Piracicaba  
2006**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Bassa, Ana Gabriela Monnerat Carvalho

Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft através do Processo Lo-Solids® / Ana Gabriela Monnerat Carvalho Bassa. - - Piracicaba, 2006.  
169 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.  
Bibliografia.

1. Celulose sulfato 2. Eucalipto 3. Pinheiro 4. Polpação 5. Propriedades físicas do papel  
6. Tecnologia da madeira I. Título

CDD 676.126

**“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”**

Aos meus pais, José Eliomar de Souza Carvalho e Maria Adelaide Monnerat Carvalho, por todos os ensinamentos, amor, compreensão e amizade. Ao meu marido Alexandre Bassa pelo amor, companheirismo e ajuda em todos os momentos.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu marido Alexandre Bassa, pela ajuda, pelos ensinamentos e compreensão.

À querida Eng<sup>a</sup> Florestal Celina Ferraz do Valle, pela amizade, por todos os ensinamentos e incentivo à vida e ao trabalho como Engenheira Florestal.

À Vera Sacon e José Eduardo Patelli, pela amizade e apoio.

Ao Professor Dr. Francides Gomes da Silva Júnior, pela oportunidade de crescimento, ensinamentos, orientação e amizade.

Aos Professores Celso Foelkel e Luiz Ernesto George Barrichelo pelas sugestões e apoio na realização deste trabalho.

Aos amigos da Votorantim Celulose e Papel, César, Edimar, Donizete, Zilda, Tatiane, Áureo, Paula, Camila, Gaita, Alessandra, Vinícius, Cândida, Fernando, Faez, Lucia, Rogério, Clélia, Jóia e todo o time de Pesquisa Florestal e do CDTC.

À Votorantim Celulose e Papel pela oportunidade.

À Klabin S.A. e Aracruz S.A. Unidade Guaíba pelo fornecimento das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptys globulus* respectivamente. Em especial aos Eng<sup>os</sup>. Ivone Satsuki Namikawa Fier e Teotônio Francisco de Assis, que apoiaram o trabalho e colaboraram com as amostras de madeira para análise.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS.....	13
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 DESENVOLVIMENTO.....	20
2.1 Revisão bibliográfica.....	20
2.1.1 Misturas de madeiras e de polpas celulósicas.....	20
2.2 Materiais e Métodos.....	30
2.2.1 Material.....	30
2.2.1.1 Amostragem das árvores.....	31
2.2.2 Métodos.....	31
2.2.2.1 Madeira.....	31
2.2.2.2 Densidade básica.....	31
2.2.2.3 Composição química da madeira.....	31
2.2.2.4 Classificação granulométrica.....	32
2.2.2.5 Polpação.....	32
2.2.2.5.1 Polpa não branqueada.....	35
2.2.2.5.2 Rendimento bruto, depurado e teor de rejeitos.....	35
2.2.2.5.3 Número kappa.....	35
2.2.2.5.4 Viscosidade.....	36
2.2.2.6 Teor de lignina na polpa.....	36
2.2.2.7 Ácidos hexenurônicos.....	36
2.2.2.8 Solubilidade em NaOH 5% - S5.....	36
2.2.2.9 Dimensões de fibras.....	36
2.2.2.10 Testes físico-mecânicos e drenabilidade.....	37
2.2.2.11 Teor de sólidos secos.....	37
2.2.2.12 Consumo específico de madeira.....	38

2.2.2.13	Delineamento experimental e análise estatística.....	38
2.3	Resultados e Discussão.....	39
2.3.1	Caracterização do material.....	39
2.3.1.1	Densidade básica da madeira.....	39
2.3.1.2	Composição química da madeira.....	41
2.3.2	Polpação Lo-solids® .....	44
2.3.2.1	Polpação Lo-solids® espécies individuais.....	44
2.3.2.2	Polpação Lo-solids® das misturas entre <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Pinus taeda</i> e <i>Eucalyptus globulus</i> .....	56
2.3.3	Composições químicas das polpas celulósicas.....	74
2.3.3.1	Composições químicas das polpas celulósicas das espécies individuais.....	74
2.3.3.2	Composições químicas das polpas celulósicas das misturas entre <i>Eucalyptus</i> <i>grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Pinus taeda</i> e <i>Eucalyptus globulus</i> .....	83
2.3.4	Características das fibras das polpas celulósicas.....	93
2.3.4.1	Características das fibras das polpas celulósicas das espécies individuais.....	93
2.3.4.2	Características das fibras das polpas celulósicas das misturas entre <i>Eucalyptus</i> <i>grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Pinus taeda</i> e <i>Eucalyptus globulus</i> .....	101
2.3.5	Testes físico-mecânicos e drenabilidade.....	113
2.3.5.1	Testes físico-mecânicos e drenabilidade das polpas celulósicas das espécies individuais.....	113
2.3.5.2	Testes físico-mecânicos e drenabilidade das polpas celulósicas das misturas entre <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Pinus taeda</i> e <i>Eucalyptus globulus</i> .....	122
3	CONCLUSÕES.....	137
	REFERÊNCIAS.....	140
	APÊNDICES.....	147

## RESUMO

### **Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* para produção de celulose kraft através do Processo Lo-Solids®**

Este estudo teve como objetivo verificar os efeitos de misturas de madeiras de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* na eficiência do processo Lo-Solids® e características das polpas celulósicas visando a diferenciação das propriedades dos papéis resultantes. Foram avaliados os comportamentos das madeiras, quanto aos parâmetros: densidade básica, composição química, polpação Lo-solids®, características químicas das polpas celulósicas, características das fibras das polpas celulósicas e testes físicos. Os mesmos parâmetros foram avaliados nas misturas entre as espécies, realizadas da seguinte forma: *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus globulus* nas proporções de 10 a 50% de *Eucalyptus globulus*. Para as misturas entre os *Eucalyptus* e o *Pinus taeda*, o número kappa das polpas celulósicas aumentou gradativamente, conforme a proporção de *Pinus taeda* aumentava na mistura, sendo que os números kappa variaram entre 17,9 e 22,1. Para atingir os números kappa desejados no trabalho, foi necessário ajustar a carga alcalina (álcali efetivo entre 19,3 e 21,3 % expresso como NaOH) e o fator H (entre 970 a 1420). 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. Nas misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus*, os números kappa variaram entre 17,9 e 18,6 e foram observadas tendências de queda dos rendimentos bruto e depurado, da viscosidade da polpa celulósica, do teor de lignina total e do coarseness, com a adição de *Eucalyptus globulus* ao *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Para os parâmetros solubilidade em NaOH 5%, número de fibras por grama, drenabilidade, índices de tração, alongamento e estouro foram verificadas tendências de aumento com o aumento da proporção de *Eucalyptus globulus* nas misturas. Com base nos resultados obtidos, a adição de até 10% de fibra de *Pinus taeda* aos *Eucalyptus* pode melhorar a qualidade da polpa para os parâmetros índice de rasgo e drenabilidade. Essas características permitem maiores velocidades de operação das máquinas secadoras de polpa celulósica e máquinas de papel e conseqüentemente conduzem a uma maior produção. 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* aos *Eucalyptus*.



Palavras-chave: Misturas de madeira; Polpação Lo-solids®; *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*; *Eucalyptus globulus*; *Pinus taeda*; Testes físico-mecânicos

## ABSTRACT

### **Mixtures of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* and *Pinus taeda* wood chips for the production of kraft pulp through Lo-Solids<sup>®</sup> process**

The objective of this study was to evaluate the possibility of cooking mixtures between the species *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* and *Pinus taeda* for the production of kraft pulp with specific characteristics. The three species were analyzed for their wood density, chemical composition, Lo-solids<sup>®</sup> pulping, the chemical characteristics of the pulp, characteristics of its fibers and physical tests. The same parameters were evaluated in the mixtures between the species that were made up as: *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* and *Pinus taeda* in the proportion of 10 to 50% of *Pinus taeda*, *Eucalyptus globulus* and *Pinus taeda* in the proportion of 10 to 50% of *Pinus taeda* and *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus globulus* in the proportion of 10 to 50% of *Eucalyptus globulus*. For the mixtures between the *Eucalyptus* and the *Pinus taeda*, the pulp kappa numbers increased as the proportion of *Pinus taeda* increased in the pulps, varying from 17.9 to 22.1. In order to reach the target kappa number it was necessary to adjust the alkali charge applied (from 19.3 to 21.3 %NaOH as effective alkali) and the H factor (between 970 and 1420). 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 the mixtures between *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus globulus* the kappa number varied from 17.9 to 18.6. *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* performed better in pulping as it needed a lower alkali charge and had a higher pulp yield and pulp viscosity. Hence, in the *Eucalyptus* mixtures a downward trend was noticed in the values for pulp yield and pulp viscosity with an increasing proportion of *Eucalyptus globulus*. Falls in total lignin content in the pulp and in the coarseness were also observed as the proportion of *Eucalyptus globulus* increased. For the parameters solubility in NaOH 5%, number of fibers per gram of pulp, drainability, strength and burst indices an increase was noticed as the proportion of *Eucalyptus globulus* increased in the pulps. In conclusion, the addition of up to 10% of *Pinus taeda* to *Eucalyptus* can increase pulp quality for the tear index and drainability parameters, making pulp and paper mills faster at drying pulp, or speeding up the paper machines, resulting in higher productivity. These mixtures also allow the production of tailor-made pulp and special papers.

Keywords: Mixtures of wood; Lo-solids<sup>®</sup> pulping; *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*; *Eucalyptus globulus*; *Pinus taeda*; Physical-mechanical tests

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Carga de álcali efetivo aplicado no cozimento Lo-solids®, base NaOH, aos materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> .....	46
Figura 2	Rendimento depurado dos materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> submetidos ao processo de cozimento Lo-solids®.....	48
Figura 3	Viscosidade (cP) das polpas celulósicas obtidas a partir materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> submetidos ao processo de cozimento Lo-solids®.....	51
Figura 4	Teor de sólidos gerados para polpas celulósicas obtidas dos materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> submetidos ao processo de cozimento Lo-solids®.....	53
Figura 5	Consumo específico de madeira dos materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> submetidos ao processo de cozimento Lo-solids®.....	55
Figura 6	Número kappa em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies..	61
Figura 7	Álcali efetivo em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies.....	62
Figura 8	Fator H em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies.....	63
Figura 9	Rendimento depurado em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies.....	64
Figura 10	Viscosidade em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies.....	67
Figura 11	Teor de sólidos gerados por tonelada de polpa celulósica em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies.....	72
Figura 12	Consumo específico em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies.....	73
Figura 13	Teores de lignina solúvel, insolúvel e total nas polpas celulósicas obtidas a partir do <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> .....	76
Figura 14	Teor de ácidos hexenurônicos das polpas celulósicas obtidas a partir do <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> .....	78
Figura 15	Número kappa corrigido das polpas celulósicas produzidas a partir do <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> .....	81
Figura 16	Solubilidade em NaOH 5% das polpas celulósicas obtidas a partir do <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> .....	82
Figura 17	Teor de lignina solúvel em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies.....	88
Figura 18	Teor de lignina insolúvel em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies.....	89

Figura 19	Teor de lignina total em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies.....	90
Figura 20	Teor de ácidos hexenurônicos em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies.....	91
Figura 21	Solubilidade em NaOH 5% em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies.....	92
Figura 22	Comprimento da fibra em polpas celulósicas obtidas a partir do <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> .....	95
Figura 23	Largura da fibra em polpas celulósicas obtidas a partir do <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> .....	96
Figura 24	Teor de finos em polpas celulósicas obtidas a partir do <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> .....	97
Figura 25	Coarseness de polpas celulósicas obtidas a partir do <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> .....	98
Figura 26	Número de fibras/grama de polpas obtidas a partir do <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> .....	99
Figura 27	Comprimento da fibra em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies.....	106
Figura 28	Largura da fibra em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies.....	108
Figura 29	Coarseness em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies.....	110
Figura 30	Número de fibras/grama em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies.....	111
Figura 31	Drenabilidade de polpas celulósicas obtidas a partir do <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> .....	114
Figura 32	Índice de rasgo em polpas celulósicas obtidas a partir do <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> .....	116
Figura 33	Índice de tração em polpas celulósicas obtidas a partir do <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> .....	117
Figura 34	Alongamento em polpas celulósicas obtidas a partir do <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> .....	118
Figura 35	Índice de estouro em polpas celulósicas obtidas a partir do <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> .....	119
Figura 36	Drenabilidade em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies....	127
Figura 37	Alongamento em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies....	129
Figura 38	Índice de rasgo em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies.....	130
Figura 39	Índice de tração em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies.....	132

Figura 40	Índice de estouro em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies.....	133
-----------	---	-----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Características físicas das pastas celulósicas de <i>Eucalyptus</i> e <i>Pinus</i> .....	24
Tabela 2	Tratamentos realizados.....	33
Tabela 3	Condições dos cozimentos: quantidade de cavacos, relação licor madeira, carga alcalina, sulfidez e fator H.....	33
Tabela 4	Tempo, temperatura e distribuição da carga alcalina nas fases do cozimento.....	34
Tabela 5	Número kappa proposto para o estudo.....	35
Tabela 6	Valores médios das densidades básicas dos cavacos e coeficiente de variação.....	40
Tabela 7	Teor de lignina total, teor de holocelulose e teor de extrativos totais da madeira.....	42
Tabela 8	Resultados médios dos cozimentos Lo-solids <sup>®</sup> realizado nos materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> .....	45
Tabela 9	Resultados médios do teor de sólidos/odt e consumo específico de madeira para os materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> submetidos ao processo de cozimento Lo-solids <sup>®</sup> .....	52
Tabela 10	Resultados médios dos cozimentos Lo-solids <sup>®</sup> realizados nas misturas entre os materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e <i>Pinus taeda</i> nas proporções de 10 a 50% de <i>Pinus taeda</i> .....	56
Tabela 11	Resultados médios dos cozimentos Lo-solids <sup>®</sup> realizados nas misturas entre os materiais <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> nas proporções de 10 a 50% de <i>Pinus taeda</i> .....	57
Tabela 12	Resultados médios dos cozimentos Lo-solids <sup>®</sup> realizados nas misturas entre os materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e <i>Eucalyptus globulus</i> , nas proporções de 10 a 50% de <i>Eucalyptus globulus</i> .....	57
Tabela 13	Resultados da análise estatística para os parâmetros avaliados na polpação Lo-solids <sup>®</sup> realizado nas misturas entre o <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e o <i>Pinus taeda</i> .....	58
Tabela 14	Resultados da análise estatística para os parâmetros avaliados na polpação Lo-solids <sup>®</sup> realizado nas misturas entre o <i>Eucalyptus globulus</i> e o <i>Pinus taeda</i> .....	59
Tabela 15	Resultados da análise estatística para os parâmetros avaliados na polpação Lo-solids <sup>®</sup> realizado nas misturas entre o <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e o <i>Eucalyptus globulus</i> .....	59
Tabela 16	Resultados médios do teor de sólidos/odt e consumo específico de madeira para as misturas entre os materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e <i>Pinus taeda</i> nas proporções de 10 a 50% de <i>Pinus taeda</i> .....	69

Tabela 17	Resultados médios e coeficiente de variação do teor de sólidos/odt e consumo específico de madeira para as misturas entre os materiais <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> nas proporções de 10 a 50% de <i>Pinus taeda</i> .....	69
Tabela 18	Resultados médios do teor de sólidos/odt e consumo específico de madeira para as misturas entre os materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e <i>Eucalyptus globulus</i> , nas proporções de 10 a 50% de <i>Eucalyptus globulus</i> .....	70
Tabela 19	Resultados da análise estatística para os parâmetros tss/odt e consumo específico de madeira das misturas entre o <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e o <i>Pinus taeda</i> .....	70
Tabela 20	Resultados da análise estatística para os parâmetros tss/odt e consumo específico de madeira das misturas entre o <i>Eucalyptus globulus</i> e o <i>Pinus taeda</i> .....	71
Tabela 21	Resultados da análise estatística para os parâmetros tss/odt e consumo específico de madeira das misturas entre o <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e o <i>Eucalyptus globulus</i> .....	71
Tabela 22	Resultados médios dos teores de lignina solúvel, insolúvel e total, ácidos hexenurônicos e solubilidade em NaOH 5% - S5 presentes nas polpas celulósicas produzidas a partir dos materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> .....	75
Tabela 23	Resultados médios para teores de: lignina solúvel, insolúvel e total, ácidos hexenurônicos e solubilidade em NaOH 5% (S5) na polpa celulósica para as misturas entre os materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e <i>Pinus taeda</i> nas proporções de 10 a 50% de <i>Pinus taeda</i> .....	84
Tabela 24	Resultados médios e coeficiente de variação para teores de: lignina solúvel, insolúvel e total, ácidos hexenurônicos e solubilidade em NaOH 5% (S5) na polpa celulósica para as misturas entre os materiais <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> nas proporções de 10 a 50% de <i>Pinus taeda</i> .....	84
Tabela 25	Resultados médios para teores de: lignina solúvel, insolúvel e total, carboidratos, ácidos hexenurônicos e solubilidade em NaOH 5% (S5) na polpa celulósica para as misturas entre os materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e <i>Eucalyptus globulus</i> , nas proporções de 10 a 50% de <i>Eucalyptus globulus</i> .....	85
Tabela 26	Resultados da análise estatística para teores de lignina, carboidratos, ácidos hexenurônicos e S5 presentes nas polpas celulósicas das misturas entre o <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e o <i>Pinus taeda</i> .....	86
Tabela 27	Resultados da análise estatística para teores de lignina, carboidratos, ácidos hexenurônicos e S5 presentes nas polpas celulósicas das misturas entre o <i>Eucalyptus globulus</i> e o <i>Pinus taeda</i> .....	86

Tabela 28	Resultados da análise estatística para teores de lignina, carboidratos, ácidos hexenurônicos e S5 presentes nas polpas celulósicas das misturas entre o <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e o <i>Eucalyptus globulus</i> .....	87
Tabela 29	Resultados médios dos parâmetros: comprimento e largura das fibras, teor de finos, coarseness e número de fibras/grama das polpas celulósicas produzidas a partir dos materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> .....	94
Tabela 30	Resultados médios dos parâmetros: comprimento e largura das fibras, teor de finos, unidade de vasos/mg polpa, coarseness e número de fibras/grama das polpas celulósicas produzidas a partir das misturas entre os materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e <i>Pinus taeda</i> nas proporções de 10 a 50% de <i>Pinus taeda</i> .....	102
Tabela 31	Resultados médios dos parâmetros: comprimento e largura das fibras, teor de finos, unidade de vasos mg polpa, coarseness e número de fibras/grama das polpas celulósicas produzidas a partir das misturas entre os materiais <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> nas proporções de 10 a 50% de <i>Pinus taeda</i> .....	102
Tabela 32	Resultados médios dos parâmetros: comprimento e largura das fibras, teor de finos, unidade de vasos/mg polpa, coarseness e número de fibras/grama das polpas celulósicas produzidas a partir das misturas entre os materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e <i>Eucalyptus globulus</i> , nas proporções de 10 a 50% de <i>Eucalyptus globulus</i> .....	103
Tabela 33	Resultados da análise estatística para características das fibras das polpas celulósicas das misturas entre o <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e o <i>Pinus taeda</i> .....	104
Tabela 34	Resultados da análise estatística para características das fibras das polpas celulósicas das misturas entre o <i>Eucalyptus globulus</i> e o <i>Pinus taeda</i> .....	104
Tabela 35	Resultados da análise estatística para características das fibras das polpas celulósicas das misturas entre o <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e o <i>Eucalyptus globulus</i> .....	105
Tabela 36	Resultados médios dos testes físico-mecânicos e drenabilidade efetuados nas polpas celulósicas não refinadas, produzidas a partir dos materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> .....	113
Tabela 37	Resultados médios da drenabilidade e dos testes físico-mecânicos efetuados nas polpas celulósicas não refinadas, produzidas a partir das misturas entre os materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e <i>Pinus taeda</i> nas proporções de 10 a 50% de <i>Pinus taeda</i> , a nível zero de refino.....	123



Tabela 38	Resultados médios da drenabilidade e dos testes físico-mecânicos efetuados nas polpas celulósicas não refinadas, produzidas a partir das misturas entre os materiais <i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus taeda</i> nas proporções de 10 a 50% de <i>Pinus taeda</i> , a nível zero de refino.....	123
Tabela 39	Resultados médios da drenabilidade e dos testes físico-mecânicos efetuados nas polpas celulósicas não refinadas, produzidas a partir das misturas entre os materiais <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e <i>Eucalyptus globulus</i> , nas proporções de 10 a 50% de <i>Eucalyptus globulus</i> .....	124
Tabela 40	Resultados da análise estatística dos testes físico-mecânicos realizados nas polpas celulósicas produzidas a partir de misturas entre o <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e o <i>Pinus taeda</i> .....	125
Tabela 41	Resultados da análise estatística dos testes físico-mecânicos realizados nas polpas celulósicas produzidas a partir de misturas entre o <i>Eucalyptus globulus</i> e o <i>Pinus taeda</i> ..	125
Tabela 42	Resultados da análise estatística dos testes físico-mecânicos realizados nas polpas celulósicas produzidas a partir de misturas entre o <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> e o <i>Eucalyptus globulus</i> .....	126

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa atualmente, uma posição de destaque na produção de celulose e papel, com o 7º lugar na classificação mundial de produtores. De acordo com o informe anual da Bracelpa, em 2005, a área plantada correspondia a 1,7 milhão de hectares, a produção de polpa celulósica de fibra curta atingiu 8,3 milhões de toneladas e a de fibra longa 1,5 milhão.

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* se destacam no cenário florestal brasileiro, pelo crescimento rápido, com ciclos de corte entre 6 e 7 anos de idade e por uma boa performance 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 m<sup>3</sup>/ha/ano, aliado 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/cm<sup>3</sup>.

O *Eucalyptus globulus* é uma outra espécie de eucalipto que se destaca no cenário mundial de produção de polpa celulósica. Esta espécie é plantada extensamente nos países Ibéricos, Austrália, Chile e Uruguai e é conhecida por apresentar produção de madeira reduzida, entre 10 e 30 m<sup>3</sup>/ha/ano, mas uma excelente qualidade da madeira, com rendimentos em polpa celulósica de até 57% e uma elevada densidade básica da madeira. Devido às características da polpa celulósica obtida a partir desta espécie, o Brasil esta apostando no seu desenvolvimento, no sul do país, onde em um futuro próximo serão instaladas novas fábricas de celulose e papel, ou ampliadas as que já estão instaladas. A região sul do país apresenta características climáticas que permitem a adaptação do *Eucalyptus globulus* e, pesquisas vêm sendo realizadas com o objetivo de selecionar árvores superiores, para plantá-las como clones, além de cruzá-las com outras espécies, para produção de híbridos que

apresentem crescimento volumétrico elevado, aliado a uma excelente qualidade da madeira.

Os plantios de *Pinus* no Brasil apresentam crescimento volumétrico entre 20 e 30 m<sup>3</sup>/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/cm<sup>3</sup>.

Ao compararmos estes dois gêneros, ou mesmo dentro do mesmo gênero, notamos 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 maiores velocidades 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.

As características diferenciadas de qualidade da madeira comentadas anteriormente impactam no processo de obtenção de polpa celulósica e nas características do produto final, que por sua vez depende da qualidade da madeira e das condições do processo de fabricação.

Os processos de polpação vêm sofrendo diversas modificações que visam melhorar sua eficiência, tanto em termos de rendimento como de propriedades da polpa celulósica obtida. Essas modificações do processo kraft têm como base uma melhor distribuição de energia e da carga alcalina, bem como a utilização de aditivos que atuem sobre a cinética de deslignificação. As modificações de engenharia deram origem à patentes de processo que genericamente são chamados de cozimentos modificados e, entre eles está o processo Lo-Solids®.

O processo Lo-solids<sup>®</sup> 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, isto é, ao mesmo tempo em que são mantidos um perfil alcalino e temperatura de cozimento uniformes, menor concentração de lignina na fase final e máxima sulfidez na fase inicial de cozimento. Através desses controles, obtêm-se uma maior flexibilidade no processo, que pode permitir otimizações conforme o produto que se deseja fabricar e/ou conforme a(s) matéria(s)-prima(s) empregada(s).

Neste estudo, verificou-se a viabilidade de produção de polpa celulósica kraft através do processo Lo-Solids<sup>®</sup> 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*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus globulus* nas proporções de 10 a 50% de *Eucalyptus globulus*. Foram consideradas distintas porcentagens de cada espécie, objetivando a verificação das características de cada matéria-prima no produto final.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Revisão bibliográfica

#### 2.1.1 Misturas de madeiras e de polpas celulósicas

No Brasil, as principais essências florestais utilizadas para produção de polpa celulósica são as espécies dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*. Do ponto de vista tecnológico, as primeiras dão origem a polpas de “fibras longas” e as de *Eucalyptus* à polpas de “fibras curtas”, sendo que o emprego de uma ou outra, aliado ao processo adequado de polpação, determina as características da polpa celulósica e, conseqüentemente, o tipo de papel a ser obtido.

Embora representando 50% da área florestal que recobre o globo terrestre, as folhosas foram por muito tempo deixadas em segundo plano pelos produtores de papel. Este desinteresse pode ser atribuído ao fato destas espécies não ocorrerem em maciços puros, da madeira de muitas delas absorverem água com grande facilidade impedindo o transporte fluvial, de apresentarem madeiras com 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 em muitos aspectos da produção de papel (FOELKEL; BARRICHELO 1975a).

O grande desenvolvimento que vem sofrendo nos últimos anos a indústria papelreira passou a pressioná-la no sentido de 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 mediterrâneos, latino-americanos e na Austrália contribuiu decisivamente para a quebra do 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 de folhosas pela indústria de celulose (FOELKEL; BARRICHELO, 1975a).

A polpa celulósica da madeira de eucalipto é geralmente empregada na produção de papel de impressão e escrita, pelas vantagens que apresenta sobre as celuloses de coníferas em termos de formação e características superficiais das folhas. Porém, há algumas décadas, o eucalipto era considerado uma matéria-prima de qualidade inferior pelos países tradicionais na produção de celulose. Esta situação sofreu uma série de mudanças decorrentes da crescente demanda de madeira coincidindo com uma escassez dos recursos fibrosos e desenvolvimento de tecnologia adequada para aproveitamento das folhosas em geral.

Madeiras de folhosas caracterizam-se por apresentar fibras mais curtas, menor teor de lignina e maior teor em holoceluloses que as madeiras de coníferas. Essas propriedades conduzem a modelos bem definidos na produção de celulose: a madeira é mais facilmente deslignificada e branqueada, os rendimentos são mais elevados, a formação e as propriedades superficiais das folhas de papel são melhoradas. Entretanto estas celuloses apresentam algumas desvantagens em relação às de coníferas, principalmente no que diz respeito à resistência ao rasgo (FOELKEL; BARRICHELO, 1975a).

De acordo com Colodette e Gomide (2001), em geral, a resistência intrínseca das fibras relaciona-se mais com a resistência ao rasgo enquanto as ligações interfibras relacionam-se com as resistências à tração e ao arrebentamento. O comprimento das fibras afeta todas as propriedades de resistência, pois é um fator crítico se a resistência intrínseca das fibras e/ou as ligações interfibras tornam-se fatores limitantes.

Entre os fatores que influenciam nas resistências à tração e ao estouro, os de maior importância são: o número de ligações entre fibras e a resistência destas ligações. No caso da resistência ao rasgo, existem dois componentes atuantes: a força necessária para arrancar a fibra da estrutura da folha e a força necessária para fraturar a própria fibra. Por isso, nos casos em que o número de ligações interfibras e a resistência destas são pequenos, a força necessária para arrancar uma fibra da estrutura vai depender do comprimento médio desta, sendo diretamente proporcional ao comprimento (BUGAJER; KUAN, 1980).

Foelkel (1977) enumera algumas propriedades em que as folhosas são superiores às coníferas e a seguir àquelas em que são inferiores, e completa que 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.

Como vantagens das polpas celulósicas de folhosas são citadas:

- Fibras mais curtas oferecem melhor formação da folha
- Fibras mais finas ocasionam melhores propriedades superficiais (folha de superfície mais lisa)
- Boas propriedades mecânicas – fibras curtas produzem papéis com propriedades mecânicas muito boas. Alta resistência ao rasgo, porém, não pode ser conseguida com fibras curtas somente.
- Menor resistência ao fluxo
- Menor teor de lignina na madeira – que pode resultar em menor consumo de químicos durante o cozimento e em tempos mais curtos de digestão
- Maior teor de hemiceluloses – estas são desejáveis nas celuloses do ponto de vista de aumentar o rendimento e pelos efeitos benéficos na ligação interfibras e na resistência da celulose.

Como desvantagens das folhosas para produção de celulose foram comentadas:

- Menor resistência ao rasgo – um traqueíde, 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.
- Resistência ao dobramento – a baixos graus de moagem as celuloses de coníferas podem apresentar resistências ao dobramento de 10 a 15 vezes maiores que as de folhosas. Entretanto, com o prolongamento da refinação as ligações interfibras aumentam e pode-se obter alta resistência ao dobramento mesmo para celuloses de fibras curtas.
- Menor resistência da folha úmida – relacionada à velocidade das máquinas de papel.
- Impressão – a presença de vasos em folhosas pode ser prejudicial quando forem obtidos papéis de impressão a partir de madeira das mesmas, pois fragmentos de vasos podem se levantar da superfície do papel durante a impressão.

Segundo Oliveira et al. (1981) as diferenças anatômicas entre as fibras de coníferas e folhosas são responsáveis por diferenças nas propriedades físico-mecânicas do papel e suas resistências. As espécies do gênero *Eucalyptus*, com fibras tipicamente curtas propiciam a produção de papéis com melhor formação, maior lisura e boas propriedades físico-mecânicas. Entretanto não se consegue alta resistência ao rasgo quando se utiliza apenas celulose de fibra curta. As características proporcionadas pelas fibras longas do *Pinus* à produção de celulose resultam em papéis com maiores resistências mecânicas, maior resistência da folha úmida e na ausência de vasos, que podem prejudicar a impressão dos papéis. É completa que tanto os aspectos técnico-econômicos relativos à produção de papel e celulose, como as próprias características anatômicas das madeiras de coníferas e folhosas têm incentivado a utilização de misturas de fibras longas e curtas na produção de papel e celulose. Essa mistura, que pode ser realizada de diversas formas, visa à manufatura de um produto final compatível com as exigências do mercado consumidor.

Na tabela 1 mostramos características físicas das polpas celulósicas de *Eucalyptus* e *Pinus* refinadas em moinho tipo Valley.



Tabela 1 - Características físicas das pastas celulósicas de *Eucalyptus* e *Pinus* (refino realizado em moinho tipo Valley)

<i>Eucalyptus</i>	Tempo de refinação, min	0	60	80	103
	Grau de refinação, °SR	16	32	44	59
	Volume específico aparente, cm <sup>3</sup> /g	2,80	2,10	1,94	1,79
	Índice de tração, N.m/g	10,2	18,8	60,1	61,8
	Índice de estouro, KPa.m <sup>2</sup> /g	0,27	2,74	3,58	4,09
	Índice de rasgo, mN.m <sup>2</sup> /g	2,37	8,16	9,90	8,24
	Resistência ao ar (Gurley), s/100ml	-	6	21	62
	Opacidade, %	82,6	82,0	82,2	82,3
<i>Pinus</i>	Tempo de refinação, min	0	35	45	60
	Grau de refinação, °SR	15	28	41	53
	Volume específico aparente, cm <sup>3</sup> /g	2,46	1,87	1,82	1,73
	Índice de tração, N.m/g	18,7	70,0	88,3	89,4
	Índice de estouro, KPa.m <sup>2</sup> /g	1,02	5,20	6,55	7,24
	Índice de rasgo, mN.m <sup>2</sup> /g	14,7	14,9	12,8	13,3
	Resistência ao ar (Gurley), s/100ml	2	38	96	148
	Opacidade, %	77,0	72,6	72,7	71,2

Fonte: Bugajer e Kuan, 1980

De acordo com Foelkel e Barrichelo (1975c) a possibilidade de cozimentos conjuntos de madeiras para a produção de celulose, especialmente pelo processo kraft, tem sido demonstrada experimentalmente com relativo sucesso. Entretanto, muitas objeções são ainda levantadas, baseadas na teoria que os cozimentos conjuntos causam degradação parcial da celulose mais fácil de deslignificar (geralmente folhosas), diminuindo assim a resistência das pastas. Outra consideração a ser levantada é que os cavacos de folhosas absorvem mais álcali, resultando em um aumento da quantidade de cavacos parcialmente cozidos de coníferas, quando a mistura é desses dois tipos de madeira. Outros autores, entretanto, negam o

fundamento da teoria acima, afirmando que cozimentos conjuntos ou misturas em separado conduzem a produtos de qualidade similares.

Os autores comentam ainda que no caso de misturas de duas ou mais celulosas, o mais comum é refinar separadamente as celulosas para depois mistura-las, pois com essa prática procura-se aproveitar ao máximo as qualidades inerentes de cada uma das polpas celulósicas. A máxima resistência ao rasgo para coníferas é geralmente obtida há tempos curtos de refinação. É usual misturar-se celulosas bem refinadas de folhosas (com resistências à tração e ao arrebetamento bem desenvolvidas) com celulosas pouco refinadas de coníferas (com alta resistência ao rasgo). O produto final deverá possuir boas resistências ao rasgo, tração e arrebetamento. Outra prática não muito comum, mas altamente desejável em certas circunstâncias, é a de se adicionar 10-20% de celulose de folhosa rica em hemicelulosas e altamente refinada (a ponto de se transformar num “limo”) a outro tipo de celulose não muito refinada. Este “limo” ou “gel” de celulose de folhosa, agindo como um agente de ligação entre fibras aumentará significativamente as resistências à tração e ao arrebetamento. Entretanto, quando se misturam polpas celulósicas não se visa apenas a melhoria de resistências. Pode-se melhorar, por exemplo, a formação do papel misturando-se pequena porcentagem de celulose de folhosa à celulose de conífera, cuja tendência para floculação é acentuada. Costuma-se também ganhar alguns pontos de alvura de certas pastas não branqueadas (pasta mecânica ou celulose sulfito) adicionando-se pequenas quantidades de celulose branqueada. Por fim, pode ocorrer também a mistura das celulosas antes da refinação. Neste caso as celulosas são misturadas nas proporções consideradas adequadas e a seguir refinadas. Este tipo de mistura exige perfeito conhecimento dos produtos a serem misturados e uma perfeita definição do produto que se deseja. Para certos tipos de papel, a mistura das celulosas antes da refinação tem-se mostrado mais recomendável que a refinação em separado.

Segundo Blomqvist (1962 apud Foelkel e Barrichelo 1975b), misturas de celulosas de coníferas e folhosas para a produção de diferentes tipos de papel são bastante comuns. Existem algumas opiniões na literatura segundo as quais a substituição de 10 a 20% de fibras curtas em pastas de fibras longas, não introduz nenhuma alteração substancial na qualidade do papel. Entretanto, cuidados especiais

devem ser tomados quando da produção de papéis tipo “kraft”, de alta resistência, a partir de misturas de celuloses de fibras longas e curtas. Sugerem-se neste caso, estudos especiais de como, quando, onde e quanto misturar para otimizar a operação. Ressalta-se que o grau de moagem de cada um dos componentes de uma mistura conífera-folhosa é um fator de extrema importância. Os resultados podem-se mostrar totalmente diversos conforme o grau a que cada celulose é refinada (ARLOV 1962 apud FOELKEL; BARRICHELO, 1975b).

Os mesmos autores realizaram ensaios de misturas entre celuloses sulfato obtidas de madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* nas proporções de 20 a 80% de *Eucalyptus saligna*. As celuloses foram refinadas separadamente, sendo o grau de moagem do *Eucalyptus saligna* 23°SR e do *Pinus caribaea* 25°SR. Como conclusão, os autores relatam que as misturas de fibras de características diferentes parecem oferecer grandes possibilidades de se produzir papéis com propriedades pré-estabelecidas.

Sacon, Menochelli e Ratnieks (1994) citam que a mistura de polpas de pinho (*Pinus*) com polpas de eucalipto podem ser utilizadas na fabricação de papéis de nível superior àqueles produzidos com polpa de eucalipto ou de pinho isoladamente. Em um ensaio com diferentes proporções de polpas de eucalipto e pinho, os autores citam que o uso da polpa de pinho permite rápido incremento da resistência ao rasgo, enquanto a polpa de eucalipto sozinha necessita de maior nível de refino. A resistência à tração, equivalente entre as misturas, determina resistência ao estouro similar. O volume específico da polpa de eucalipto nestes níveis de resistência à tração e estouro é superior, assim como sua opacidade. Este conjunto de características é muito buscado em algumas aplicações nos papéis de imprimir e escrever associados com a excelente formação da folha que o eucalipto propicia.

Trabalhando com misturas de polpas celulósicas sulfato branqueada de eucalipto brasileira e sulfato branqueada de pinho finlandesa não refinadas e refinadas separadamente e misturadas em diferentes proporções, Bugajer e Kuan (1980) concluíram que as características físicas de misturas de polpas celulósicas de eucalipto e de pinho variam com o grau de refinação das pastas e com a proporção da mistura. E acrescentam que quando a mistura é feita com pastas celulósicas pouco ou não

refinadas, as resistências à tração e ao estouro da mistura praticamente não se alteram com a quantidade de fibras de eucalipto, com exceção do volume específico e opacidade que aumentam com o aumento do teor de fibras de eucalipto na mistura e a resistência ao rasgo, que diminui acentuadamente com a adição de fibras de eucalipto. As baixas resistências à tração e ao estouro obtidas quando a mistura é feita com as pastas celulósicas de pinho e eucalipto pouco ou não-refinadas são justificadas pelo pequeno número de ligações interfibras existentes na folha. À medida que as pastas são refinadas o número de ligações aumenta, aumentando as resistências à tração e ao estouro. O mesmo fato é válido para a resistência ao rasgo, pois com as polpas pouco ou não refinadas o número de ligações interfibras e a resistência destas são pequenas, portanto a força necessária para arrancar uma fibra da estrutura vai depender diretamente do comprimento médio desta.

Bugajer e Kuan (1980) completam que quando a mistura obtida com pasta de pinho pouco ou não refinada e pasta de eucalipto refinada, as resistências à tração e ao estouro aumentam consideravelmente com o aumento da quantidade de fibras de eucalipto, que contribuem para aumentar o número de ligações entre as fibras da estrutura da folha. Verificou-se que neste caso a resistência ao rasgo também aumenta notadamente com uma adição de até 50% de pasta de eucalipto, diminuindo com uma percentagem mais elevada. Acrescentando-se certa quantidade de fibras de eucalipto refinadas à pasta de pinho não refinada, ocorre um aumento de ligações interfibras, aumentando a resistência ao arrancamento das fibras. Porém, quando a quantidade de fibras de eucalipto passa a ser predominante na mistura, o efeito do comprimento passa a atuar no sistema. O volume específico aparente da mistura diminui com o aumento da quantidade de fibras de eucalipto refinadas, pois ocorrendo uma maior ligação entre as fibras da estrutura, esta apresenta uma menor espessura, para uma folha com a mesma gramatura. A opacidade da mistura aumenta com a quantidade de pasta de eucalipto adicionada ao sistema.

Garlet, Andriotti e Sacon (1991) realizaram um trabalho visando a avaliação de algumas propriedades óticas e físico-mecânicas do papel a partir de misturas a 0, 25, 70 e 100% de polpa kraft branqueada de eucalipto com polpa sulfito e kraft de fibras longas também branqueadas. Foram realizados testes em polpas sem refino e

refinadas a 25 e 35°SR. Verificou-se que as propriedades óticas do papel como a alvura, opacidade e o coeficiente de dispersão de luz foram melhorados com o aumento da percentagem da polpa de eucalipto no papel formado, ao passo que essas mesmas propriedades foram afetadas negativamente com o aumento do grau de refino. A tração e a elongação aumentaram com o refino, porém a primeira obteve seus maiores valores nos papéis formados com 25% de polpa de eucalipto. Para papéis formados de polpas sem refino, a mistura de fibra de eucalipto à fibra longa resulta num decréscimo mais pronunciado de resistência ao rasgo, do que naqueles formados com polpas refinadas até um certo limite. A polpa kraft de fibra longa, quando presente, resulta em papéis com resistência ao rasgo e volume específico maiores se comparada à presença de polpa sulfito de fibra longa.

Chen, Garceau e Kokta (1978) citam que existem poucos trabalhos publicados sobre cozimentos de misturas de madeiras de fibra curta e fibra longa. Esses autores realizaram um estudo sobre a influência da porcentagem de madeira de fibra curta no rendimento e na qualidade da polpa kraft em uma mistura entre as espécies *Picea glauca* e *Populus tremuloides*. Como resultado, foi observado um acréscimo no rendimento depurado entre 2 a 4%, uma menor geração de rejeitos, pouco efeito no consumo de álcali e uma melhor deslignificação. Para pequenas proporções de madeira de fibra curta, não foi observada mudança significativa nas resistências a úmido.

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*. Por serem as madeiras diferentes quanto à anatomia e à composição química, foram utilizadas diferentes níveis de álcali ativo (14 e 16%) e de fator H (900 e 1100) e as demais variáveis de cozimento foram mantidas fixas: sulfidez 25%, temperatura máxima de 170°C, tempo até temperatura máxima de 90 minutos e relação licor madeira de 4:1. Os resultados demonstraram que os maiores rendimentos depurados foram obtidos para os cozimentos com 100% de cavacos de eucalipto e à medida que se aumentava o teor de madeira de *Pinus strobus* na mistura, o rendimento depurado diminuía sensivelmente. Para teor de rejeitos, observou-se um aumento à medida que se aumentava a proporção de cavacos de *Pinus strobus*, sendo que teores

aceitáveis de rejeitos foram alcançados para todos os cozimentos com 100% de eucalipto. De acordo com o aumento da dosagem de cavacos de *Pinus*, eram necessárias condições mais drásticas para reduzir o teor de rejeitos a níveis adequados. Os números kappa obtidos no trabalho variaram entre 21,0 a 94,6. A proporção de cavacos de *Pinus strobus* na mistura influenciou significativamente o número kappa, sendo que, para quaisquer condições de cozimento, o aumento da dosagem de cavacos de *Pinus* resultava em aumento do número kappa. A madeira de *Pinus* mostrou-se de difícil deslignificação e mesmo as condições mais drásticas estudadas, não foram suficientes para obtenção de polpas com números kappa inferiores a 40. Logo, deduziu-se que, para a madeira de *Pinus*, as condições de cozimento deveriam ser ainda mais drásticas, a fim de que fosse possível deslignificar o produto até número kappa cerca de 30, valor aceitável para branqueamento de celulose de coníferas. Para viscosidade, observou-se que à medida que aumentava a proporção de cavacos de *Pinus*, a viscosidade das celuloses resultantes diminuía. Com relação às propriedades físico-mecânicas das celuloses, Oliveira et al. (1981) cita que a percentagem de cavacos de *Pinus* na mistura exerceu efeito significativo sobre o tempo de refino, que por sua vez influenciou o grau de refino. Desse modo, para obter um grau de refino pré-fixado, é necessário maior tempo, à medida que é aumentada a percentagem de madeira de *Pinus*. A densidade aparente das folhas de celulose foi influenciada pelo grau de refino e pela percentagem de madeira de *Pinus*, porém nesse caso, apenas para os tratamentos com fator H 1100. Para fator H 900 não foram constatadas diferenças entre as densidades aparentes das folhas. Para fator H 1100, a densidade aparente das folhas aumentou de 0% para 100% de *Pinus*, o que sugere que as fibras longas e largas tendem a se colapsarem com o refino, quando mais deslignificadas. Observou-se que dentro dos dois níveis de fator H, a percentagem de *Pinus* influenciou a resistência à tração para 14% de álcali ativo, bem como o grau de refino. Para um mesmo fator H, a resistência aumentou até certo ponto com o aumento da dosagem de *Pinus*, para depois estacionar ou diminuir. Nos baixos graus de refino, o aumento das percentagens de fibra longas na mistura correspondia a um aumento da resistência à tração, porém, nos níveis de refino mais altos ocorria o contrário. A resistência ao arrebentamento aumentou de acordo com o aumento do teor de fibras

longas, em baixos graus de refino, porém a partir de 40°SR, as resistências das celuloses obtidas nos tratamentos com 100% de *Pinus* e 100% de *Eucalyptus* foram estatisticamente semelhantes. A percentagem de *Pinus* exerceu ação significativa sobre a resistência ao rasgo, em todos os níveis de fator H e álcali ativo testados. Entretanto, a intensidade do refino, em quaisquer das proporções de fibras longas estudadas, resultou sempre na diminuição da resistência ao rasgo.

Nos trabalhos citados na revisão de literatura, sobre misturas de madeiras e de polpas celulósicas, de maneira geral buscava-se utilizar a madeira de eucalipto ou polpas celulósicas de eucalipto em substituição à madeira ou polpas celulósicas de fibra longa em uso na época, visando uma redução do custo de produção, além da tentativa de encontrar um substituto à espécie de fibra longa, uma vez que já se visualizava sua escassez, mantendo as características de qualidade das polpas celulósicas; deve-se ressaltar ainda que nos trabalhos que consideravam o cozimento conjunto de folhosas e coníferas utilizou-se apenas sistemas convencionais de cozimento. No presente trabalho, os objetivos diferem das citações acima, pois parte-se do princípio de produção de polpa celulósica com 100% de *Eucalyptus* na sua composição e, acrescenta-se o *Pinus taeda*, visando à produção de uma polpa celulósica com características diferenciadas, além de considerar o processo contínuo modificado Lo-solids<sup>®</sup>.

## **2.2 Materiais e Métodos**

### **2.2.1 Material**

Para realização do estudo foram utilizados três materiais distintos, sendo eles: 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, *Eucalyptus globulus* com 7 anos de idade proveniente de plantios experimentais da Aracruz Unidade Guaíba - RS e *Pinus taeda* com 9 anos de idade proveniente de plantio comercial da Klabin, na região de Telêmaco Borba, Paraná.

### **2.2.1.1 Amostragem das árvores**

Foram amostradas 10 árvores para cada material genético com diâmetro à altura do peito (DAP, 1,3m) médio do povoamento (dados de inventário). 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 (acoplável a tomada de força de tratores) da marca Demuth.

## **2.2.2 Métodos**

### **2.2.2.1 Madeira**

Para caracterização da madeira, os cavacos de cada uma das 10 árvores de cada material genético foram avaliados individualmente (3 repetições para cada árvore), buscando verificar a homogeneidade entre as árvores para o parâmetro densidade básica (Apêndice A).

De posse dos resultados, considerou-se que para uma maior homogeneidade de cada material considerado neste trabalho, seriam misturados os cavacos das árvores cujas densidades básicas estivessem compreendidas no intervalo entre a densidade básica média de cada material, mais ou menos um desvio-padrão. Desse modo, foram excluídas três árvores, e formadas amostras compostas de 7 árvores, para cada material genético. Os tratamentos foram realizados a partir dessa amostra composta.

Análises de densidade básica realizadas novamente, na amostra composta.

### **2.2.2.2 Densidade básica**

A densidade básica foi determinada pelo método do máximo teor de umidade (FOELKEL, BRASIL, BARRICHELO, 1972).

### **2.2.2.3 Composição química da madeira**

O teor de extrativos totais foi determinado pela norma TAPPI T204.



O teor de lignina foi determinado pela norma TAPPI T222.

O teor de holocelulose foi obtido por diferença através da equação

$$\text{Holocelulose (\%)} = 100 - (\text{extrativos (\%)} + \text{lignina (\%)}) \quad (1)$$

#### **2.2.2.4 Classificação granulométrica**

Todas as amostras de cavacos foram classificadas em classificador dotado de movimento vibratório e provido de peneiras com orifícios de diâmetro de 45, 22, 7 e 3mm, classificatórias para tamanho médio ponderado dos cavacos e uma peneira de barras de 8mm classificatória para espessura dos cavacos. As frações de cavacos retidas na peneira com orifícios de 45 mm e as que ultrapassaram a peneira com orifícios de 5 mm foram desprezadas – “oversizes” e finos, respectivamente.

As frações selecionadas foram secas ao ar e armazenadas em sacos de polietileno para uniformização e conservação da umidade.

#### **2.2.2.5 Polpação**

Foram realizados 18 cozimentos Lo-solids<sup>®</sup> 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 secos.

Os tratamentos realizados no trabalho podem ser visualizados na tabela 2.

Tabela 2 - Tratamentos realizados

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> (%)	<i>Eucalyptus globulus</i> (%)	<i>Pinus taeda</i> (%)
100	-	-
-	100	-
-	-	100
90	-	10
80	-	20
70	-	30
60	-	40
50	-	50
-	90	10
-	80	20
-	70	30
-	60	40
-	50	50
90	10	-
80	20	-
70	30	-
60	40	-
50	50	-

As condições de cozimento estão expressas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Condições dos cozimentos: quantidade de cavacos, relação licor madeira, carga alcalina, sulfidez e fator H

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 4 - Tempo, temperatura e distribuição da carga alcalina nas fases do cozimento

Fases	Tempo (min.)	Temperatura (°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	-

Foram feitas 2 injeções de licor branco durante o processo de polpação, de volume variável, conforme a carga de álcali aplicada. A frequência das injeções foi definida de forma que o perfil de álcali residual e o teor de sólidos do licor se mantivessem estáveis ao longo das fases de cozimento. Antes de cada injeção foi feita a remoção de um volume equivalente do licor de cozimento para que a relação licor madeira pudesse ser mantida.

O número kappa a ser alcançado na polpa marrom variou conforme o tratamento. Para os tratamentos com *Eucalyptus* buscou-se o número kappa  $18 \pm 1$ . Para o tratamento com *Pinus taeda* buscou-se o número kappa  $26 \pm 1$ . Para os tratamentos em que se adicionou *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% aos *Eucalyptus*, o número kappa a ser alcançado foi resultado da ponderação do número kappa dos materiais puros com a participação de cada material, conforme a tabela 5.

Tabela 5 - Número kappa proposto para o estudo

<i>Eucalyptus</i> (%)	<i>Pinus</i> (%)	Número kappa
100	0	18,0
90	10	18,8
80	20	19,6
70	30	20,4
60	40	21,2
50	50	22,0
0	100	26,0

#### 2.2.2.5.1 Polpa não branqueada

Após cada cozimento a polpa obtida foi lavada com água em excesso até todo o licor existente ser visualmente removido. Esta etapa foi conduzida utilizando-se sacos de microfibras e água corrente desmineralizada. Em seguida a amostra de polpa foi centrifugada, desagregada e armazenada em sacos de polietileno sob refrigeração a  $5^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , para que os ensaios posteriores pudessem ser realizados.

#### 2.2.2.5.2 Rendimento bruto, depurado e teor de rejeitos

Para cada cozimento foi determinada a quantidade de celulose absolutamente seca produzida. A relação percentual entre o peso de celulose absolutamente seca produzida e o peso de madeira absolutamente seca utilizado forneceu o rendimento bruto. Em seguida, por meio de depuração em depurador TMP com fenda de 0.2 mm os rejeitos foram separados da polpa celulósica produzida. Estes rejeitos foram então secos em estufas a  $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$  e a relação percentual entre o peso seco de rejeitos e o peso seco de madeira utilizada no cozimento forneceu o teor de rejeitos. O rendimento depurado foi obtido pela diferença entre o rendimento bruto e o teor de rejeitos.

#### 2.2.2.5.3 Número kappa

O número kappa das polpas foi determinado pela norma TAPPPI T236.

#### **2.2.2.5.4 Viscosidade**

A viscosidade das polpas foi determinada de acordo com a norma TAPPI T230.

#### **2.2.2.6 Teor de lignina na polpa**

O teor de lignina presente na polpa não branqueada foi determinado através da norma TAPPI T222.

#### **2.2.2.7 Ácidos hexenurônicos**

Os ácidos hexenurônicos foram determinados de acordo com metodologia desenvolvida por Chai et al. (2001).

#### **2.2.2.8 Solubilidade em NaOH 5% - S5**

A solubilidade em NaOH foi determinada conforme a metodologia SCAN C2:61.

#### **2.2.2.9 Dimensões de fibras**

As dimensões das fibras da polpa obtidas nos cozimentos foram determinadas utilizando-se o equipamento Fiber Quality Analyser (FQA), que identifica partículas em suspensão aquosa passando por uma célula de fluxo. A célula de fluxo consiste de três compartimentos, sendo que as fibras em suspensão entram pelo compartimento central que fica localizado na parte de baixo da célula de fluxo e passam por um canal, cuja função é orientar as fibras, sem afetar suas formas. Esta orientação auxilia a visualização das fibras por uma câmera. Nos outros dois compartimentos ocorre um fluxo de água que auxilia a orientação das fibras e protege a célula de fluxo de contaminantes. Uma fonte de luz spectral vermelho distante, localizada na parte esquerda da célula de fluxo emite uma luz, que passa por um filtro circular polarizado e chega à célula de fluxo. Ao atingir uma fibra, ocorre uma mudança de fase que permite que a luz passe por um segundo filtro circular polarizado e atinja a câmera localizada ao lado direito da célula de fluxo. Apenas estruturas cristalinas altamente organizadas, como a celulose das fibras, são capazes de causar essa mudança de fase em luzes

polarizadas circulares. Por isso, o FQA não é capaz de detectar tintas, pitch, ou quaisquer produtos que afetariam os resultados.

Para medição do comprimento da fibra, o equipamento mede o contorno desta, pois deste modo, a análise é realizada com maior acurácia, uma vez que se obtêm o real comprimento das fibras curvadas. A largura da fibra é medida diversas vezes ao longo do comprimento desta e o coarseness é calculado com base na massa seca de polpa celulósica utilizada para a análise, dividida pelo comprimento das fibras medidas no teste. O intervalo de medição é dado da seguinte forma:

- ✓ Comprimento da fibra – 0,07-10,0mm
- ✓ Largura da fibra – 7-60µm
- ✓ Teor de finos – 0,07-0,20mm

#### **2.2.2.10 Testes físicos-mecânicos e drenabilidade**

As análises de drenabilidade foram realizadas conforme a metodologia SCAN-C 19:65.

As análises de tração, alongamento, rasgo e estouro foram determinadas de acordo com as metodologias SCAN – P38:80 (tração e alongamento), SCAN – P 11:96 (rasgo) e SCAN – P 24:77 (estouro).

#### **2.2.2.11 Teor de sólidos secos**

O teor de sólidos secos gerados por tonelada de polpa produzida foi estimado pela seguinte expressão:

$$tss / odt = \frac{(100 - RB) + AA}{RD} \quad (4)$$

Onde:

Tss/odt = teor de sólidos secos gerados por tonelada de celulose (tss/odt);

RB = rendimento bruto (%);

RD = rendimento depurado (%).

AA = álcali ativo aplicado (como Na<sub>2</sub>O) (%);

Deve-se destacar que a equação (3) não considera a perda alcalina.

### 2.2.2.12 Consumo específico de madeira

O consumo específico de madeira foi obtido pela seguinte expressão:

$$CE_m = \frac{1}{\frac{Db}{RD}} \quad (5)$$

Onde:

$CE_m$  = consumo específico de madeira ( $m^3/t$ );

$Db$  = densidade básica ( $g/cm^3$ );

$RD$  = rendimento depurado (%).

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. O rendimento depurado para cada mistura foi obtido através de análises de polpação.

### 2.2.2.13 Delineamento experimental e análise estatística

Os parâmetros de caracterização dos materiais utilizados neste trabalho foram analisados estatisticamente através de Análise de Variância (ANOVA); quando a Análise de Variância detectou diferença estatística para algum parâmetro entre os materiais em questão, realizou-se o teste de Tukey.

Para avaliação do efeito das misturas entre as espécies sobre os parâmetros de polpação e características da polpa realizou-se análise de regressão e ajustamento de equações aos dados observados, que explicassem o comportamento das variáveis estudadas e permitissem estimar valores para características da polpa, conforme a mistura entre as espécies, nas diferentes proporções testadas. 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 ( $R^2$ ).

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é igual ao quadrado do coeficiente de correlação de Pearson. Este é uma medida da proporção da variabilidade em uma variável que é explicada pela variabilidade da outra. É pouco comum encontrarmos uma correlação perfeita ( $R^2=1$ ) na prática, porque existem muitos fatores que determinam as relações entre variáveis na vida real. Um coeficiente de determinação de 0,8 indica que em apenas 20% dos casos, a variação observada no item medido, não pode ser descrita ou explicada pela variável testada. Os resultados com coeficiente de determinação igual ou superior a 0,8 foram considerados no trabalho.

## **2.3 Resultados e Discussão**

### **2.3.1 Caracterização do material**

As madeiras de híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* utilizadas neste trabalho foram avaliadas quanto às variáveis densidade básica e composição química.

#### **2.3.1.1 Densidade básica da madeira**

A densidade básica da madeira é definida como a relação entre o peso absolutamente seco e o volume saturado da madeira, sendo a mesma de fundamental importância para o processo de polpação, tendo em vista o aspecto econômico relacionado ao consumo específico de madeira, influência sobre as variáveis do processo de produção de polpa celulósica e características da polpa celulósica (ALMEIDA, 2003).

Segundo Kollmann e Cote (1968 apud Schilling et al. 1997), as variações na densidade da madeira são devidas principalmente a diferenças na estrutura e, em menor grau, à presença de constituintes estranhos. A estrutura da madeira é caracterizada pela soma proporcional de diferentes tipos celulares, como as fibras,



traqueídes, vasos, canais resiníferos, raios e por suas dimensões, especialmente a espessura das paredes celulares. Tendências hereditárias, influências fisiológicas e mecânicas, assim como fatores ambientais (solo, calor, precipitação, ventos, etc.) afetam a estrutura da madeira e conseqüentemente sua densidade.

Na tabela 6 são apresentados os resultados médios de densidade básica dos materiais avaliados.

Tabela 6 - Valores médios das densidades básicas dos cavacos não classificados

Tratamento	Densidade básica (g/cm <sup>3</sup> )
<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i>	0,502 a
<i>Eucalyptus globulus</i>	0,497 a
<i>Pinus taeda</i>	0,332 b

As médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade

Os resultados apresentados na tabela 6 representam a média de três repetições. Realizou-se a análise de variância (Apêndice B) e teste de Tukey. A análise de variância mostrou diferença estatística significativa para o parâmetro densidade básica entre os materiais avaliados, sendo que o *Pinus taeda* difere do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e do *Eucalyptus globulus*, mas o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus* não diferem entre si.

O valor de densidade básica observado para o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* está de acordo com os valores obtidos por Bassa (2002); Almeida (2003) e Alencar (2002), onde foram encontrados valores de densidade básica de 0,543, 0,499 e 0,521 g/cm<sup>3</sup> respectivamente, com idade entre 6 e 7 anos.

Perez (2002) analisou um ensaio de procedências e progênies de *Eucalyptus globulus* provenientes da Austrália, instalado no Departamento de Tacuarembó no Uruguai com 6 anos de idade e encontrou valores de densidade básica entre 0,494 a 0,567 g/cm<sup>3</sup>.

Para o *Pinus taeda* o valor de densidade básica encontrado, de 0,332 g/cm<sup>3</sup>, é semelhante ao observado por Barrichelo et al. (1977), que ao avaliar diferentes procedências de *Pinus taeda*, aos 9 anos de idade, na região de Telêmaco Borba (PR) encontrou uma amplitude de variação de 0,354 a 0,404 g/cm<sup>3</sup>.

Silva Jr. et al. (1994) cita que a densidade média de *Pinus taeda* é de 0,370 g/cm<sup>3</sup>, em povoamentos comerciais no sul do Brasil.

Mendes (1993) avaliou árvores de *Pinus taeda* com 8, 10, 12, 16, 18 e 20 anos de idade, procedentes da região de Correia Pinto, SC. Os resultados de densidade básica obtidos, em ordem de idade foram: 0,332, 0,349, 0,351, 0,367, 0,389, 0,388 e 0,396 g/cm<sup>3</sup>.

Desse modo, os resultados de densidade básica obtidos e apresentados na tabela 6 podem ser considerados típicos para os materiais em questão.

### **2.3.1.2 Composição química da madeira**

Os processos químicos de polpação são influenciados pela composição química da madeira, a qual é determinante na eficiência do processo de polpação, influenciando no consumo de reagentes, no rendimento em polpa celulósica, na quantidade de sólidos gerados e outros fatores. 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).

A tabela 7 apresenta os resultados médios dos constituintes químicos da madeira.

Tabela 7 - Teor de lignina total, teor de holocelulose e teor de extrativos totais da madeira

Tratamento Parâmetro	<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Pinus taeda</i>
Lignina total (%)	28,54 a	30,16 b	31,18 c
Extrativos (%)	2,50 a	1,42 b	2,37 a
Holocelulose (%)	68,90 a	68,42 b	66,44 c

As médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade

Os materiais avaliados apresentam variação com relação à composição química da madeira. A análise de variância dos resultados de teores de lignina total, extrativos totais e holocelulose pode ser visualizada no Apêndice B.

Na comparação entre os resultados obtidos nos diferentes materiais avaliados, verifica-se que o *Pinus taeda* apresenta maior teor de lignina total, 31,18%, seguido do *Eucalyptus globulus*, com 30,16%. O *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* apresentou um teor de lignina total menor, 28,54%, sendo a diferença entre o *Eucalyptus globulus* e o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* de 5,6%.

Para teores de extrativos, o *Eucalyptus globulus* apresentou resultado inferior aos demais, enquanto o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda*, apresentaram valores similares, de 2,50 e 2,37%, respectivamente.

O híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus* apresentaram teores de holocelulose de respectivamente 68,9 e 68,42%. O *Pinus taeda* apresentou 66,44% de holocelulose na sua composição.

Mokfienski et al. (2003) avaliou amostras de madeiras de *Eucalyptus globulus* e de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e obteve para teor de lignina total, 28,0 e 27,6% para os híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e 26,1% para o *Eucalyptus globulus*.

O *Eucalyptus globulus* é uma espécie tida por apresentar teores de lignina total relativamente baixos, 19,9% conforme as citações de Paschoal Neto, Evtuguin e Paulino (1997), para amostras com 9 anos de idade originadas de plantios clonais pertencentes

ao RAIZ (Instituto de Investigação da Floresta e Papel), Portugal, e 20,5 e 23,0% em amostras coletadas aos 8 anos de idade provenientes de plantios florestais da indústria Klabin Riocell, localizados no Estado do Rio Grande do Sul, de acordo com Cardoso et al. (2002). Entretanto, Kibblewhite, Johnson e Shelbourne (2000) avaliaram essa mesma espécie em testes de procedência instalados na Austrália, aos 8 e 11 anos de idade e obtiveram resultados de 31,9 e 27,4% para teor de lignina total.

O valor obtido para teor de lignina na amostra de *Eucalyptus globulus* avaliada nesse trabalho é considerado elevado para o material em questão, com base em informações de literatura, de países que cultivam essa espécie para produção de polpa celulósica e papel, como os países Ibéricos. Duas suposições podem ser feitas em relação a esse fato: 1) O maior teor de lignina obtido na amostra seria causado pela adaptação da espécie a um país de clima tropical 2) A população amostrada para a realização do trabalho, é proveniente de material de semente importada da Austrália e não passou por seleção genética no Brasil, fato que também pode contribuir para um teor de lignina mais elevado.

Gomide (2005) estudou a composição química de 13 clones comerciais de *Eucalyptus*, provenientes de empresas florestais brasileiras e obteve resultados variando entre 27,5 e 31,7% para teor de lignina total, 1,76 e 4,13% para teor de extrativos solúveis em álcool/tolueno e 64,5 a 70,2% para tores de holocelulose.

Alencar (2002) avaliou a composição química de um material híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* aos 7 anos de idade e encontrou valores de 27,38% para teor de lignina, 2,72% para teor de extrativos totais e 69,9% para teor de holocelulose.

Os valores obtidos nesse trabalho para o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* podem ser considerados típicos para o material em questão.

Vasconcelos (2005) avaliou a composição química de *Pinus taeda*, aos 9 anos de idade, proveniente da Fazenda Monte Alegre, PR; para lignina total, extrativos totais e holocelulose foram obtidos os valores de 29,74, 4,50 e 70,26%, respectivamente. O autor cita que o material utilizado no trabalho representa o material comercialmente utilizado no Brasil para produção de polpa celulósica de fibra longa e são típicos para madeira de *Pinus taeda* na idade considerada. Assim, considera-se o *Pinus taeda*

utilizado no presente trabalho, um material típico de plantios dessa espécie, na região sul do Brasil.

De acordo com Cardoso et al. (2002), quanto maior o teor de lignina, maior a carga de álcali necessária para efetuar a deslignificação e, um aumento na carga de álcali provocaria maior degradação e dissolução dos polissacarídeos da madeira, provocando redução no rendimento.

Carvalho et al. (1998) cita que, em geral, maiores teores de lignina presentes na madeira podem exigir maiores cargas de reagentes químicos durante o processo de cozimento, assim como maiores teores de extrativos, que também colaboram para tal, além de possuírem maior potencial para formação de depósitos de “pitch” em equipamentos, principalmente, telas e feltros, e, ainda afetarem o potencial de absorção de líquidos no papel.

### **2.3.2 Polpação Lo-solids®**

#### **2.3.2.1 Polpação Lo-solids® das espécies individuais**

Na tabela 8 são apresentados os resultados médios dos principais parâmetros dos cozimentos Lo-solids® realizados para os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*. Deve-se destacar que a carga alcalina e o fator H foram ajustados visando a obtenção de polpa celulósica com número kappa determinado, conforme apresentado no item 2.2.2.5.

Tabela 8 - Resultados médios dos cozimentos Lo-solids® realizado nos materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*

Tratamentos Parâmetros	<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Pinus taeda</i>
Álcali efetivo (%NaOH)	17 a	17,9 b	23,5 c
Fator H	520 a	520 a	1500 b
Número kappa	17,9 a	17,2 a	25,6 b
Rendimento bruto (%)	54,23 a	51,97 b	43,04 c
Teor de rejeitos (%)	0,014 a	0,07 a	0 a
Rendimento depurado (%)	54,21 a	51,89 b	43,04 c
Viscosidade (cP)	93,2 a	82,8 a	26,4 b

Sulfidez = 30% para todos os tratamentos. As médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade

As análises de variância dos resultados de polpação para os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* encontram-se apresentadas no Apêndice C.

Nos processos químicos de produção de celulose, nos quais ocorre uma inter-relação entre as variáveis de deslignificação, a temperatura máxima de cozimento e a carga alcalina são de grande importância industrial, pois afetam diretamente a taxa de remoção de lignina e a qualidade do produto final, além de serem facilmente controláveis nas operações industriais (CARDOSO et al. 2002).

Segundo Bugajer et al. (1979), o fator H é uma variável que relaciona o tempo e a temperatura de cozimento. Esse mesmo autor ressalta que o fator H utilizado para o eucalipto é cerca de 30 a 50% menor que o utilizado para coníferas.

Verifica-se pela tabela 8 que, para os materiais avaliados, foram necessários teores distintos de álcali efetivo (NaOH%) e fator H, para atingir o número kappa proposto no estudo, de  $18 \pm 1$  para as espécies de *Eucalyptus* e de  $26 \pm 1$  para o *Pinus taeda*. Para as espécies de eucalipto, utilizou-se o mesmo fator H, de 520, porém o *Eucalyptus globulus* precisou de 5,3% a mais de álcali efetivo quando comparado com o

material híbrido, para atingir o número kappa desejado. O *Pinus taeda*, devido à natureza da sua lignina, além do maior teor de lignina na sua composição, e suas características anatômicas, que exercem influência sob a impregnação de licor nos cavacos, necessitou de uma carga de álcali efetivo de 23,5% e de um fator H de 1500, para atingir o número kappa proposto, de  $26 \pm 1$ .

Na figura 1 pode-se observar o teor de álcali efetivo aplicado aos materiais avaliados.

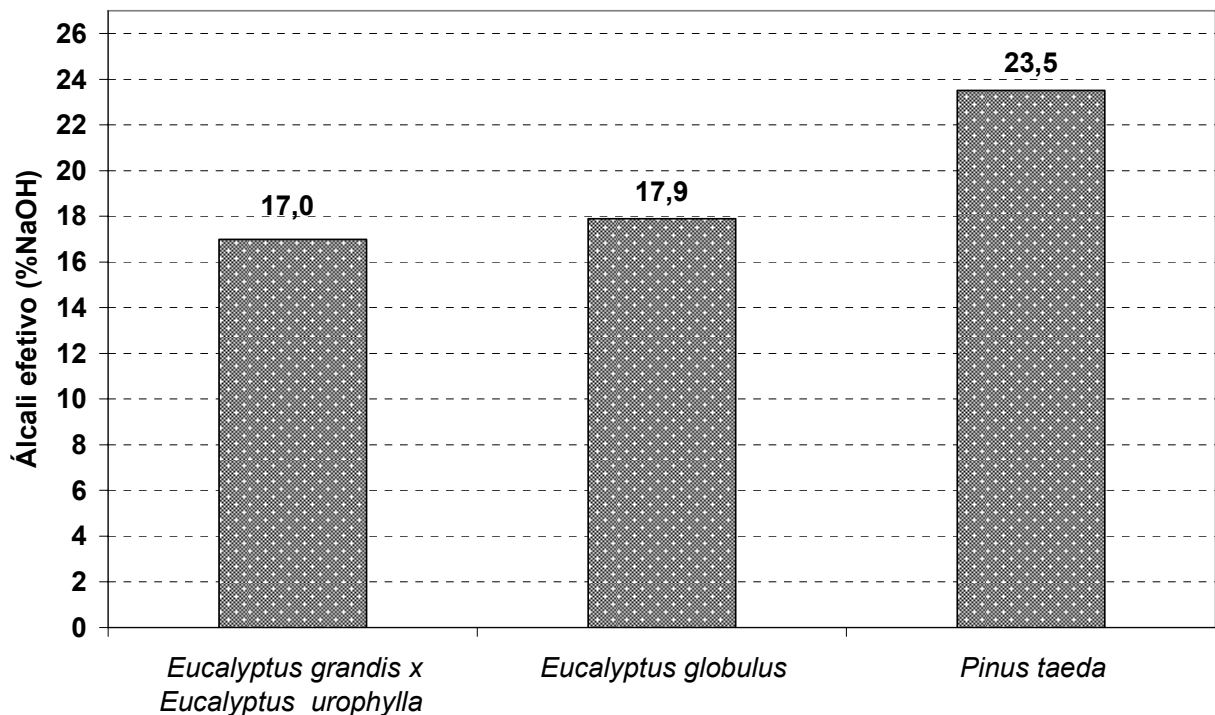


Figura 1 - Carga de álcali efetivo aplicado no cozimento Lo-solids®, base NaOH, aos materiais *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*

Chiang et al. (1988) em um estudo comparativo entre madeiras de folhosas e coníferas para produção de polpa kraft, concluíram que o álcali aplicado é maior para coníferas do que para folhosas e que este fato pode ser atribuído à natureza reativa da lignina de folhosa.

Oliveira, Foelkel e Gomide (1981) realizaram cozimentos convencionais de *Pinus strobus* var. *chiapensis* e *Eucalyptus urophylla* e citam que por serem madeiras

diferentes quanto à anatomia e à composição química, foram utilizadas diferentes condições de álcali ativo e de fator H.

O número kappa comumente utilizado em fábricas produtoras de polpa celulósica branqueável varia, para espécies de eucalipto entre 15 a 20, enquanto para espécies de pinus são praticados números kappa entre 20 e 30. Segundo Almeida (1999) para produção de polpa branqueável, é desejável uma deslignificação mais intensa no cozimento, o que torna mais fácil as operações de branqueamento, visando obter polpa de mercado com alvura maior ou igual a 88%ISO e com custos e impactos ambientais compatíveis. Os números kappa obtidos no presente trabalho estão dentro da faixa praticada comercialmente, para as espécies avaliadas.

Pelos resultados dos cozimentos experimentais expostos na tabela 8, verifica-se que para os parâmetros rendimento bruto e depurado as amostras avaliadas apresentam variação significativa.

Na figura 2 pode-se visualizar os valores de rendimento depurado obtidos nas polpas dos materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*.



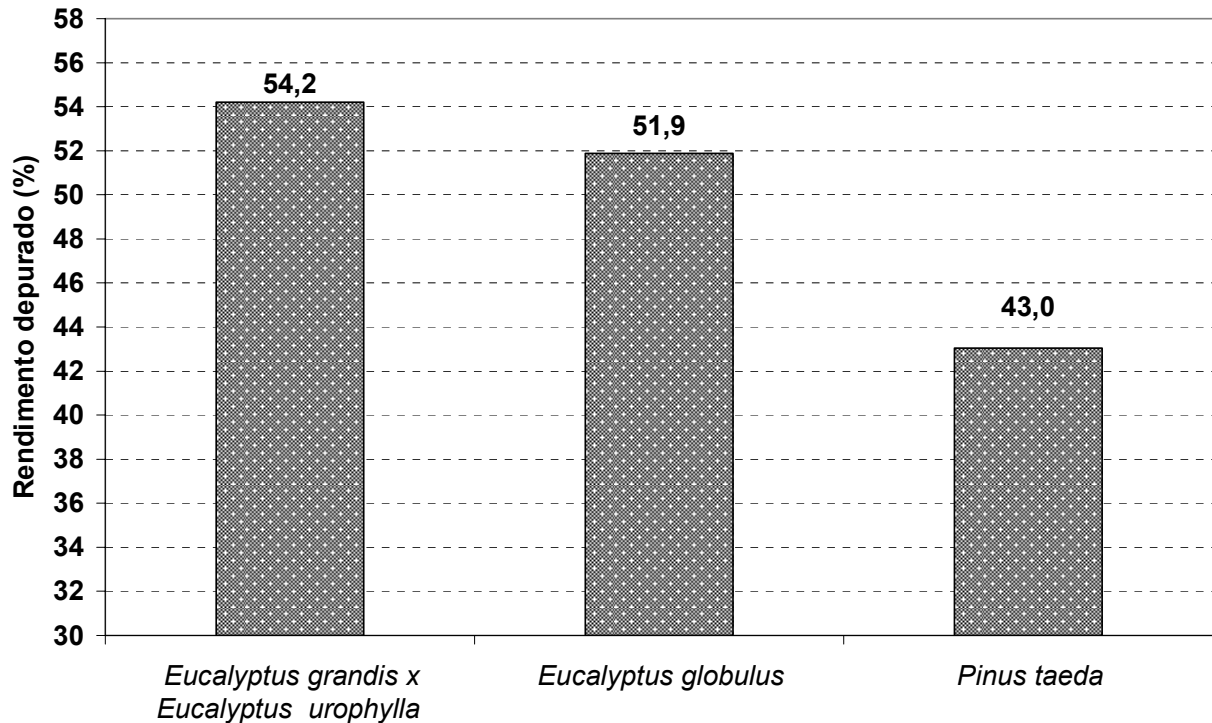


Figura 2 - Rendimento depurado dos materiais *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* submetidos ao processo de cozimento Lo-solids®

Observa-se, pela figura 2 que os *Eucalyptus* apresentam rendimento em polpa celulósica superior ao *Pinus taeda*, sendo que entre os *Eucalyptus* avaliados, destaca-se o *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, com 54,2% de rendimento depurado.

Esperava-se, para o *Eucalyptus globulus* um rendimento em polpa celulósica superior ao obtido no presente trabalho, uma vez que são reportados em literatura valores de rendimento elevados para esse material.

O rendimento em polpa é uma característica de extrema importância em uma unidade industrial, pois exerce influência sobre a geração de sólidos dissolvidos no licor de cozimento, que serão queimados na caldeira de recuperação, sobre o consumo específico de madeira e conseqüentemente sobre os custos de produção. Desse modo, quanto maior o rendimento depurado, menor será a geração de sólidos, bem como o consumo específico de madeira e os custos de produção de polpa celulósica em uma unidade industrial.

As madeiras avaliadas neste trabalho apresentam características distintas e as condições de cozimento, como distribuição da carga alcalina e perfil de temperatura devem ser otimizados, na busca da obtenção de melhores resultados de rendimento em polpa celulósica. Entretanto, esse não foi objetivo do presente trabalho.

Diversos autores avaliaram a madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* mediante o processo de polpação kraft convencional e Lo-solids®. Os resultados de rendimento depurado obtidos por Bassa (2002) para uma mesma amostra, para números kappa entre 16 e 18 variaram respectivamente entre 50,20 e 52,12% no cozimento kraft convencional e entre 50,51 e 52,65% no cozimento Lo-solids®. Almeida (2003) utilizando o processo de polpação Lo-solids® avaliou dois materiais híbridos e obteve resultados de rendimento depurado de 51,89% com número kappa de 17,1 e 51,60 % com número kappa de 18,0.

Perez (2002) analisou um ensaio de procedências e progênies de *Eucalyptus globulus* provenientes da Austrália, instalado no Departamento de Tacuarembó no Uruguai com 6 anos de idade. O processo de polpação utilizado foi o processo sulfato. Os valores de rendimento depurado observados variaram entre 48 e 51%, para números kappa entre 18 e 21.

Barrichelo et al. (1977) avaliaram um teste de procedência de *Pinus taeda* com 9 anos de idade instalado na região de Telêmaco Borba, Paraná. Foram realizadas análises de polpação kraft e os resultados de rendimento indicaram valores entre 47,6 e 49,9%, para número de permanganato igual a 25.

Oliveira, Foelkel e Gomide (1981) avaliaram o comportamento de *Pinus strobus* var. *chiapensis* frente ao processo de polpação kraft e obtiveram resultados de rendimento bruto e depurado de 44,5 e 41,8% respectivamente, para um número kappa de 41,9.

Os resultados obtidos no presente trabalho indicam que o processo de polpação Lo-solids® apresenta vantagens em relação à citação de Oliveira, Foelkel e Gomide (1981), porém, pode ainda ser otimizado com o objetivo de se obter melhores resultados no processo de polpação, pois o rendimento em polpa obtido foi inferior à citação de Barrichelo et al. (1977).

Nas amostras avaliadas, conforme a tabela 8, não foi observada diferença estatística para teor de rejeitos. Ressalta-se a baixa geração de rejeitos para os cozimentos realizados com *Pinus taeda*. Isto se deve ao elevado fator H e carga alcalina aplicados para obtenção de polpa branqueável.

A viscosidade da polpa celulósica é um parâmetro utilizado para controle da qualidade da polpa nas diferentes fases do processo de produção. O parâmetro viscosidade está associado ao grau médio de polimerização e do correspondente peso molecular dos polímeros de celulose e hemiceluloses, sendo essa medida utilizada para estimar indiretamente, o nível de degradação dos carboidratos durante as fases do processo de obtenção da polpa celulósica. Sendo assim, de maneira geral, maior valor de viscosidade indica maior preservação dos carboidratos e, conseqüentemente, melhores propriedades de resistência físicas, principalmente aquelas que dependem da ligação entre fibras (ALMEIDA, 2003).

A figura 3 apresenta os valores de viscosidade da polpa celulósica obtida para os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*.

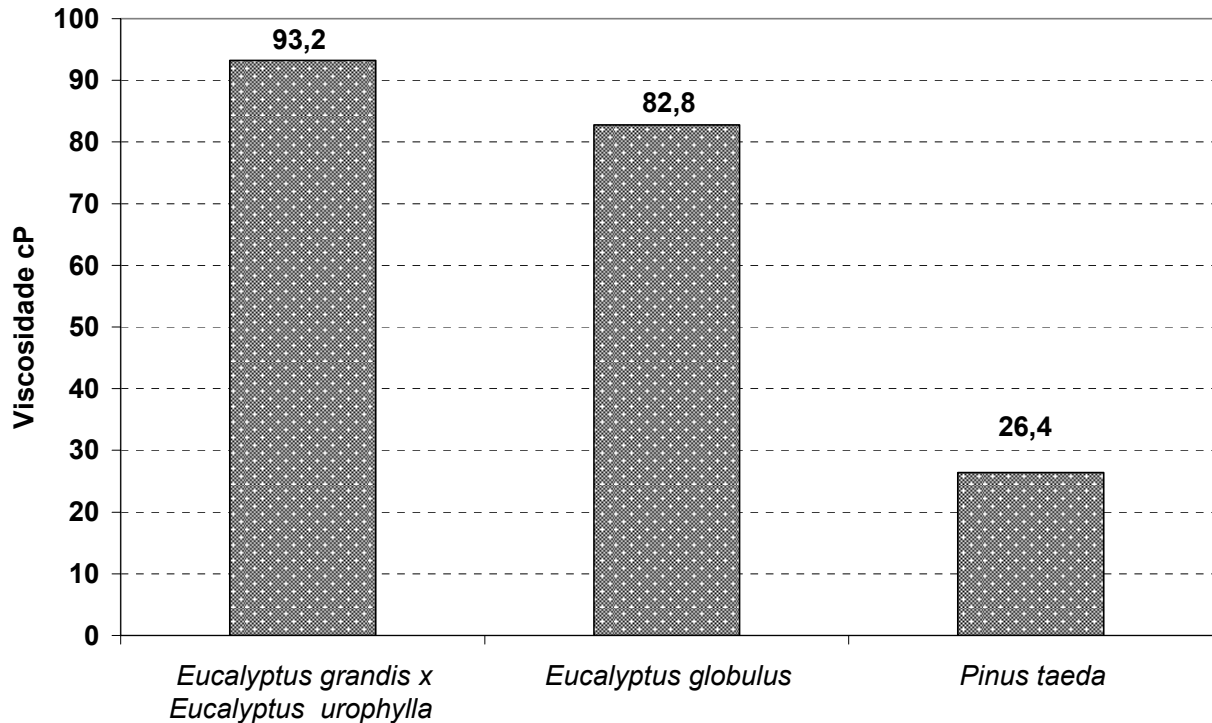


Figura 3 - Viscosidade (cP) das polpas celulósicas obtidas a partir materiais *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* submetidos ao processo de cozimento Lo-solids®

Os valores de viscosidade encontrados estão consoantes com os valores obtidos por Gomide (2005), em cozimentos modificados, que encontrou valores de viscosidade entre 59,1 a 129,6 cP, em polpas celulósicas de número kappa entre 17,7 e 18,5 obtidas a partir de doze clones comerciais de *Eucalyptus* plantados pelas principais produtoras de celulose e papel brasileiras.

Mokfienski et al. (2003) avaliou a viscosidade da polpa celulósica submetida ao processo de polpação kraft convencional de um clone de *Eucalyptus globulus* e o valor de viscosidade obtido foi de 66,3 cP. O mesmo autor avaliou dois materiais híbridos de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, sob o mesmo processo de polpação e obteve valores de 51,2 e 50,4 cP. O número kappa praticado pelos autores situou-se entre 17 e 18.

Conell et al. (2006) avaliaram o comportamento de *Pinus taeda* frente ao processo de polpação batch convencional e obtiveram polpas celulósicas com número

kappa entre 23 e 67. Para as polpas celulósicas de número kappa 23,0, 23,4, 26,7 e 27,0 as viscosidades obtidas foram iguais a 23,8, 25,8, 28,3 e 28,9cP, respectivamente.

Os valores de viscosidade obtidos no presente trabalho para os materiais avaliados são, de maneira geral, mais elevados do que alguns resultados comentados anteriormente, para números kappa similares. Esse fato pode ser atribuído à maior seletividade do processo de cozimento Lo-solids®.

A partir dos resultados de rendimento em polpa celulósica e álcali ativo, calculou-se o teor de sólidos gerados por tonelada de celulose produzida (tss/odt). Adicionalmente, calcularam-se os valores de consumo específico de madeira, levando em consideração o rendimento do processo de polpação obtido para os diferentes tratamentos e também a densidade básica dos mesmos. Os resultados são apresentados na tabela 9.

Tabela 9 - Resultados médios do teor de sólidos/odt e consumo específico de madeira para os materiais *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* submetidos ao processo de cozimento Lo-solids®.

Tratamentos Parâmetros	<i>Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Pinus taeda</i>
tss/odt	1,13 a	1,24 b	1,82 c
Consumo específico (m <sup>3</sup> /odt)	3,67 a	3,88 a	7,00 b

As médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade

A análise de variância dos resultados de teor de sólidos gerados por tonelada de celulose produzida (tss/odt) e consumo específico de madeira, para os materiais *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* encontra-se apresentada no Apêndice C.

Por sólidos se entendem o material inorgânico, proveniente da carga alcalina aplicada, e o material orgânico oriundo dos componentes da madeira dissolvidos durante o processo de polpação. O teor de sólidos gerados durante o processo de polpação está diretamente relacionado à capacidade de produção de polpa celulósica de uma unidade industrial, pois a caldeira de recuperação é um componente do

processo industrial de polpação que apresenta capacidade de queima de sólidos determinada e, esta capacidade normalmente determina a capacidade de produção de polpa celulósica de uma unidade industrial, desde que não haja restrição na alimentação de cavacos ao digestor, nem na disponibilidade de vapor.

Na figura 4 pode-se visualizar os valores obtidos para o teor de sólidos secos gerados por tonelada de polpa celulósica produzida.

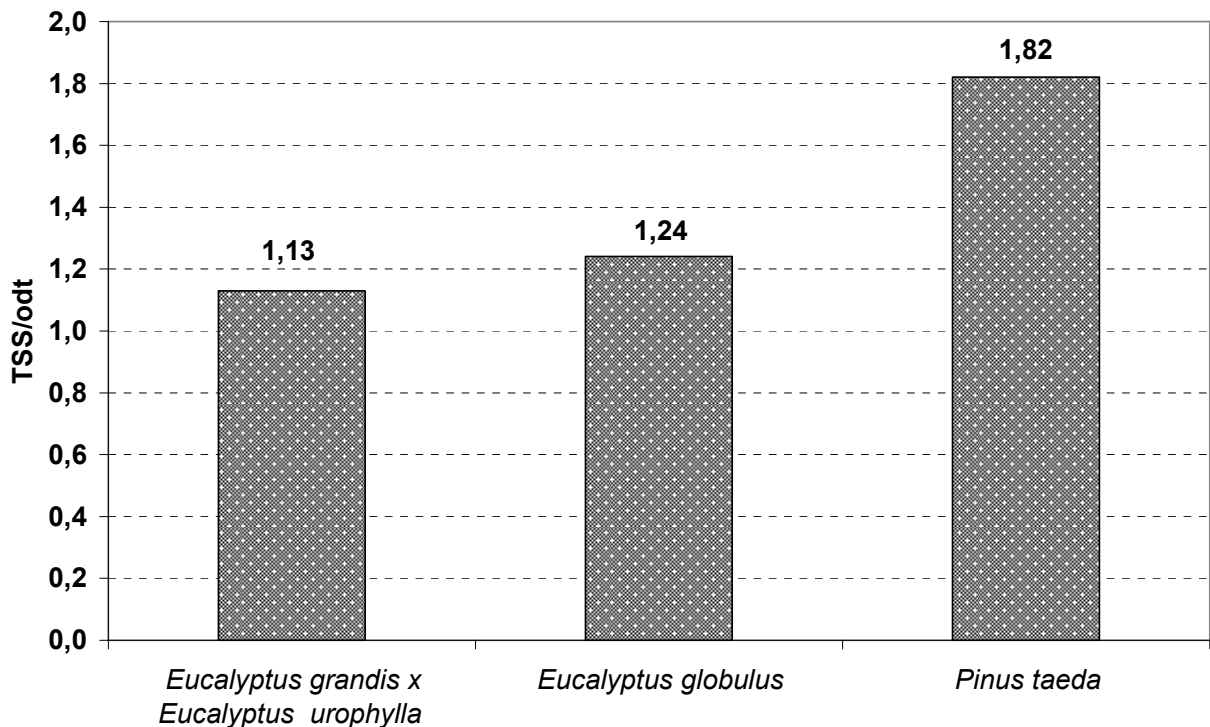


Figura 4 - Teor de sólidos gerados para polpas celulósicas obtidas dos materiais *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* submetidos ao processo de cozimento Lo-solids®

Os *Eucalyptus* apresentam 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).

Com relação aos *Eucalyptus*, o *Eucalyptus globulus* apresenta um tss/odt 9,7% superior ao *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, fato que pode ser atribuído

também à maior carga alcalina aplicada e ao menor rendimento em polpa obtido para o *Eucalyptus globulus*.

O aumento do teor de sólidos em uma planta produtora de polpa celulósica esta diretamente relacionado à redução da capacidade de produção, em função da capacidade de queima da caldeira de recuperação. Por exemplo, uma unidade produtora de polpa celulósica que possui uma caldeira de recuperação com capacidade de queima de 3.000 toneladas de sólidos/dia e apresenta um tss/odt para polpa branqueada de 1,40tss/odt é capaz de produzir 2.142 toneladas de celulose/dia. Caso o tss/odt sofra um aumento de 9,7%, este passa a ser 1,53tss/odt. Consequentemente, a capacidade da unidade produtora é reduzida, pois nessas condições, esta terá capacidade de produzir 1.960 toneladas de celulose/dia, que equivale a uma perda de produção de 181 toneladas de celulose/dia, ou aproximadamente 60.000 toneladas de celulose em um ano, quando comparado com a situação anterior.

Para os materiais avaliados, o cálculo do tss/odt considerou apenas as perdas de sólidos que ocorrem no digestor durante o processo de polpação. Para essas condições, ao considerar uma unidade produtora de polpa celulósica com uma caldeira de recuperação com capacidade de queima de 3.000 toneladas de sólidos por dia, pode-se verificar que a capacidade de produção de polpa celulósica dos materiais avaliados seria de 2.655, 2.419 e 1.648 toneladas de celulose/dia, respectivamente para o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*.

Os valores de consumo específico de madeira obtidos são apresentados na figura 5.

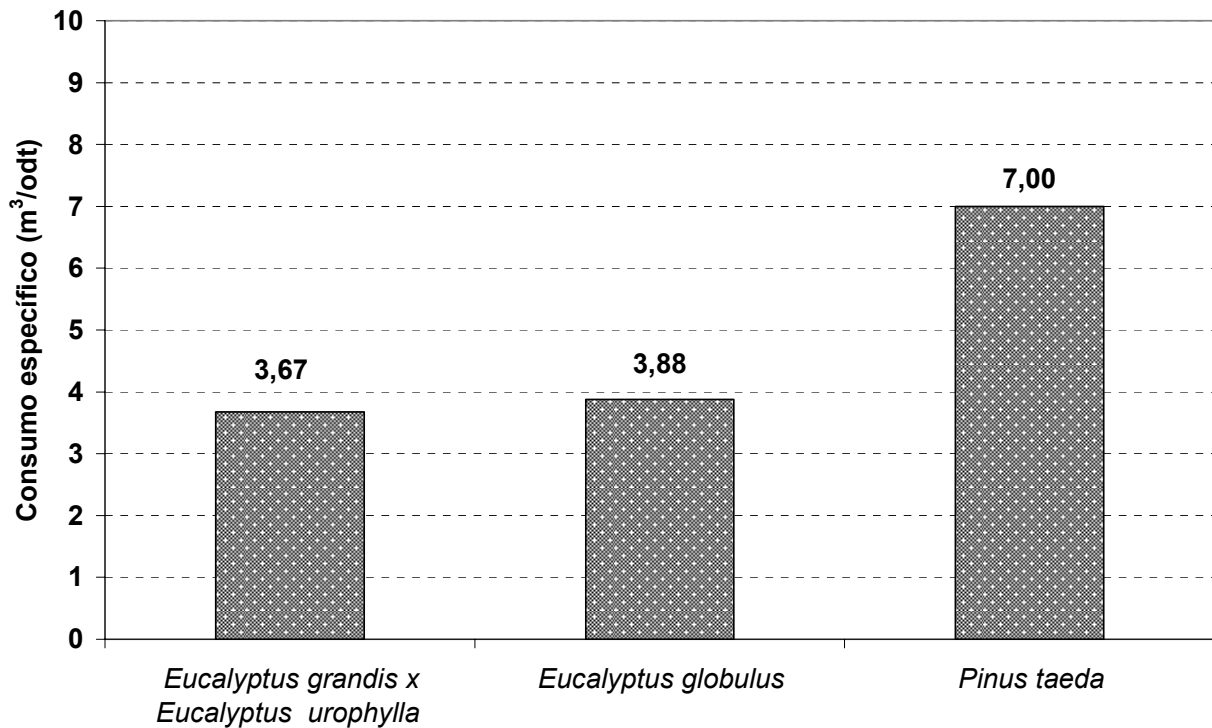


Figura 5 – Consumo específico de madeira dos materiais *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* submetidos ao processo de cozimento Lo-solids®

Os resultados obtidos evidenciam a influência da densidade básica e do rendimento em polpa celulósica da madeira sobre o consumo de madeira no processo de polpação. Assim, confirma-se a importância do emprego de madeiras mais densas e de maior rendimento na fabricação de polpa celulósica, uma vez que a quantidade de madeira (em m³) necessária para produzir uma tonelada de polpa é menor e conseqüentemente a área de floresta necessária para abastecimento de uma unidade industrial também será menor, supondo uma produção de polpa celulósica fixa.

Silva Jr. e McDonough (2002) citam que são grandes as implicações econômicas relativas ao rendimento do processo kraft, indo desde a intensidade das atividades silviculturais, passando por custos financeiros das unidades produtoras, atingindo conseqüentemente os custos de produção. Os autores completam que o efeito da redução de rendimento tem como conseqüência uma tendência de aumento na geração de sólidos, um aumento do consumo específico de madeira e obviamente um aumento do custo de produção de celulose.



### 2.3.2.2 Polpação Lo-solids® das misturas entre *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Pinus taeda* e *Eucalyptus globulus*

Nas tabelas 10, 11 e 12 são apresentados os resultados médios dos cozimentos Lo-solids® para as misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*, para as misturas entre os materiais *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda* e para as misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus globulus*, nas proporções de 10 a 50% de *Eucalyptus globulus*.

Tabela 10 - Resultados médios dos cozimentos Lo-solids® realizados nas misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Pinus taeda</i>							
% <i>Pinus taeda</i>	Álcali efetivo (%NaOH)	Fator H	Nº kappa	RB (%)	Teor de rejeitos (%)	RD (%)	Viscosidade cP
0	17,0	520	17,9	54,23	0,01	54,21	93,2
10	19,3	970	19,1	51,35	0,03	51,30	46,0
20	20,5	1150	19,0	49,65	0,01	49,64	36,0
30	21,0	1190	20,3	48,90	0,02	48,88	35,1
40	21,0	1340	21,0	47,99	0,02	47,97	30,1
50	21,3	1420	22,1	47,31	0,01	47,29	32,5
100	23,5	1500	25,6	43,04	0	43,04	26,4

Onde: RB = rendimento bruto, RD = rendimento depurado. Sulfidez = 30% para todos os tratamentos

Tabela 11 - Resultados médios dos cozimentos Lo-solids® realizados nas misturas entre os materiais *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus globulus</i> + <i>Pinus taeda</i>							
% <i>Pinus taeda</i>	Álcali efetivo (%NaOH)	Fator H	Nº kappa	RB (%)	Teor de rejeitos (%)	RD (%)	Viscosidade cP
0	17,9	520	17,2	51,97	0,07	51,89	82,8
10	20,0	970	17,9	49,56	0,02	49,54	43,3
20	20,8	1150	19,3	49,44	0,03	49,41	35,4
30	21,0	1190	20,7	48,24	0,03	48,20	34,5
40	21,3	1340	21,2	47,57	0,02	47,55	35,0
50	21,3	1420	22,1	47,39	0,01	46,88	33,7
100	23,5	1500	25,6	43,04	0	43,04	26,4

Onde: RB = rendimento bruto, RD = rendimento depurado. Sulfidez = 30% para todos os tratamentos

Tabela 12 - Resultados médios dos cozimentos Lo-solids® realizados nas misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus globulus*, nas proporções de 10 a 50% de *Eucalyptus globulus*.

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Eucalyptus globulus</i>							
% <i>Eucalyptus globulus</i>	Álcali efetivo (%NaOH)	Fator H	Nº kappa	RB (%)	Teor de rejeitos (%)	RD (%)	Viscosidade cP
0	17,0	520	17,9	54,23	0,01	54,21	93,2
10	17,2	520	18,6	53,45	0,01	53,43	86,4
20	17,3	520	18,1	52,82	0,02	52,80	88,9
30	17,3	520	18,5	53,35	0,02	53,32	80,2
40	17,4	520	18,1	53,36	0,03	53,33	78,6
50	17,5	520	17,9	53,34	0,04	53,31	72,5
100	17,9	520	17,2	51,97	0,07	51,89	82,8

Onde: RB = rendimento bruto, RD = rendimento depurado. Sulfidez = 30% para todos os tratamentos

A análise de variância dos resultados apresentados nas tabelas 10, 11 e 12 pode ser observada nos Apêndice D, E e F.

As tabelas 13, 14 e 15 apresentam um resumo da análise estatística dos resultados de polpação das misturas avaliadas nesse trabalho. Nela pode-se visualizar o resultado das análises de variância (significativo ou não), o modelo ajustado, com seus parâmetros a e b e os resultados de correlação obtidos.

Tabela 13 - Resultados da análise estatística para os parâmetros avaliados na polpação Lo-solids® realizado nas misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Pinus taeda</i>					
Parâmetro	Anova	Modelo ajustado	a	b	R <sup>2</sup> (%)
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

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

Tabela 14 - Resultados da análise estatística para os parâmetros avaliados na polpação Lo-solids® realizado nas misturas entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus globulus + Pinus taeda</i>					
Parâmetro	Anova	Modelo ajustado	a	b	R <sup>2</sup> (%)
Álcali efetivo (%NaOH)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	18,1931	0,495776	94,58
Fator H	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	543,614	125,563	98,99
Número kappa	Significativo	$Y = a + bx$	17,1202	0,103357	96,84
Rendimento bruto (%)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	51,9251	-0,65626	96,41
Teor de rejeitos (%)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	0,061341	-0,00652	48,13
Rendimento depurado (%)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	51,9548	-0,68938	97,13
Viscosidade cP	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	1306,34	-45,4236	84,48

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

Tabela 15 - Resultados da análise estatística para os parâmetros avaliados na polpação Lo-solids® realizado nas misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus*

<i>Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla + Eucalyptus globulus</i>					
Parâmetro	Anova	Modelo ajustado	a	b	R <sup>2</sup> (%)
Álcali efetivo (%NaOH)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	16,9916	0,066036	96,70
Fator H	-	-	-	-	-
Número kappa	Não significativo	-	-	-	-
Rendimento bruto (%)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	53,965	-0,12259	38,47
Teor de rejeitos (%)	Significativo	$Y = a + bx$	0,010571	0,000447	68,72
Rendimento depurado (%)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	53,9524	-0,12521	39,80
Viscosidade cP	Significativo	$Y = 1/(a + bx)$	0,000716	9,137E-7	69,53

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

Na análise dos resultados obtidos para os cozimentos dos materiais individuais, o número kappa proposto no estudo foi de  $18 \pm 1$  para as espécies de *Eucalyptus* e de 26

$\pm 1$  para o *Pinus taeda*. Desse modo, ao realizar os cozimentos conjuntos entre as espécies de *Eucalyptus* e o *Pinus taeda*, buscou-se aumentar gradativamente o número kappa das polpas celulósicas, visando preservar o rendimento em polpa das misturas e ao mesmo tempo, manter a branqueabilidade destas. Para tal, foi feita uma ponderação, conforme a proporção de *Eucalyptus* e de *Pinus taeda* na mistura, que variou entre zero a 50%, e o número kappa do cozimento a ser obtido para os materiais puros. Por exemplo, no cozimento de 90% de *Eucalyptus globulus* e 10% *Pinus taeda* ponderou-se  $(18 \times 0,9) + (26 \times 0,10)$ , sendo 18 o número kappa proposto para os *Eucalyptus* e 26 o número kappa proposto para o *Pinus taeda*. Assim, o número kappa a atingir para a mistura de 90% de *Eucalyptus globulus* e 10% *Pinus taeda* seria de  $18,8 \pm 1$ . Esta ponderação foi realizada para todas as misturas a serem testadas e, desse modo, foram estabelecidos os números kappa a serem adotados, conforme a participação do *Pinus taeda*.

Para atingir o número kappa desejado, conforme a mistura utilizou-se a estratégia de variar o álcali efetivo aplicado e o fator H.

Desse modo, na tabela 10 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 para as misturas.

Para misturas entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda*, a mesma estratégia foi utilizada, sendo que os números kappa das misturas variaram entre 17,9 e 22,1.

Para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus* manteve-se a variação de número kappa estipulada para o trabalho, de  $18 \pm 1$ , para as espécies de *Eucalyptus*.

Oliveira, Foelkel e Gomide (1981) em estudo sobre cozimentos convencionais conjuntos entre *Pinus strobus* var. *chiapensis* e *Eucalyptus urophylla* observaram que a proporção de cavacos de *Pinus* na mistura influenciou significativamente o número kappa. Para as condições de cozimento avaliadas, o aumento da proporção de cavacos de *Pinus* resultava no aumento do número kappa. A madeira de eucalipto foi deslignificada com relativa facilidade, produzindo polpas celulósicas com número kappa ao redor de 20, que permite um branqueamento econômico. Contrariamente, as madeiras de *Pinus* mostraram-se de difícil deslignificação e, mesmo as condições mais

drásticas de cozimento, 16% de álcali ativo base  $\text{Na}_2\text{O}$  e Fator H de 1100, não foram suficientes para obtenção de polpas celulósicas com números kappa inferiores a 40. Desta forma, para a madeira de *Pinus*, as condições de cozimento deveriam ser ainda mais drásticas a fim de que fosse possível atingir um nível de deslignificação com número kappa cerca de 30, valor aceitável para branqueamento de celulose de coníferas.

Para permitir uma melhor visualização e interpretação dos dados apresentados nas tabelas 10, 11 e 12, os resultados das misturas foram plotados juntos. O eixo das ordenadas representa a porcentagem de *Pinus taeda* nas misturas com o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e com o *Eucalyptus globulus*, e também a porcentagem do *Eucalyptus globulus* nas misturas com o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

Na figura 6 são apresentados os resultados de número kappa obtidos nas misturas testadas.

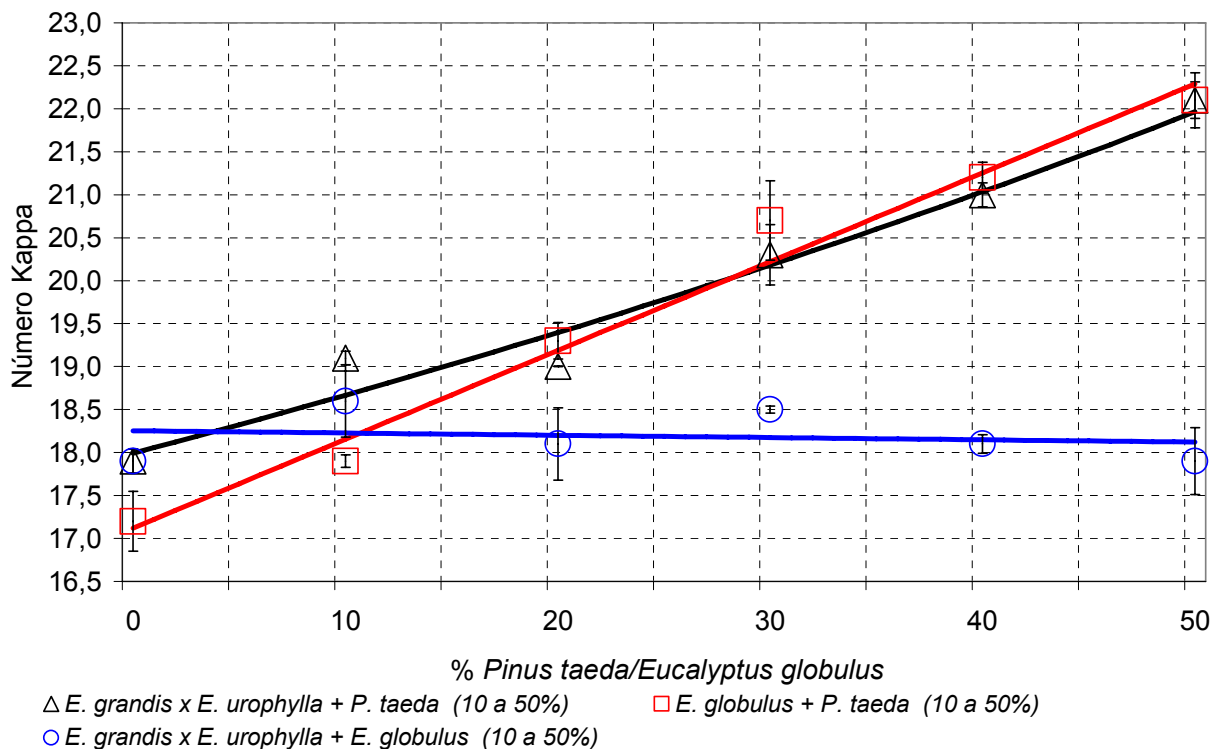


Figura 6 - Número kappa em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

Observa-se, na figura 6, conforme apresentado nas tabelas 10, 11 e 12, o efeito da adição de *Pinus taeda* sobre o número kappa das polpas celulósicas, com um

coeficiente de determinação de 0,96 para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* e de 0,97 para as misturas entre o *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*. Isso ocorre devido à estratégia utilizada no trabalho, que visou o aumento gradual do número kappa conforme a participação do *Pinus taeda* nas misturas, com o objetivo de preservar o rendimento em polpação. A estratégia utilizada pode ser justificada pelo fato de que comercialmente, polpas celulósicas destinadas ao branqueamento, oriundas de madeira de coníferas, apresentam número kappa mais elevado, entre 20 e 30, com o objetivo de preservar o rendimento no processo de polpação.

Para atingir os números kappa propostos no estudo, foi necessário ajustar a carga alcalina e o fator H. Na figura 7 é apresentado o comportamento do álcali efetivo em função da porcentagem de *Pinus taeda* e *Eucalyptus globulus* nas misturas.

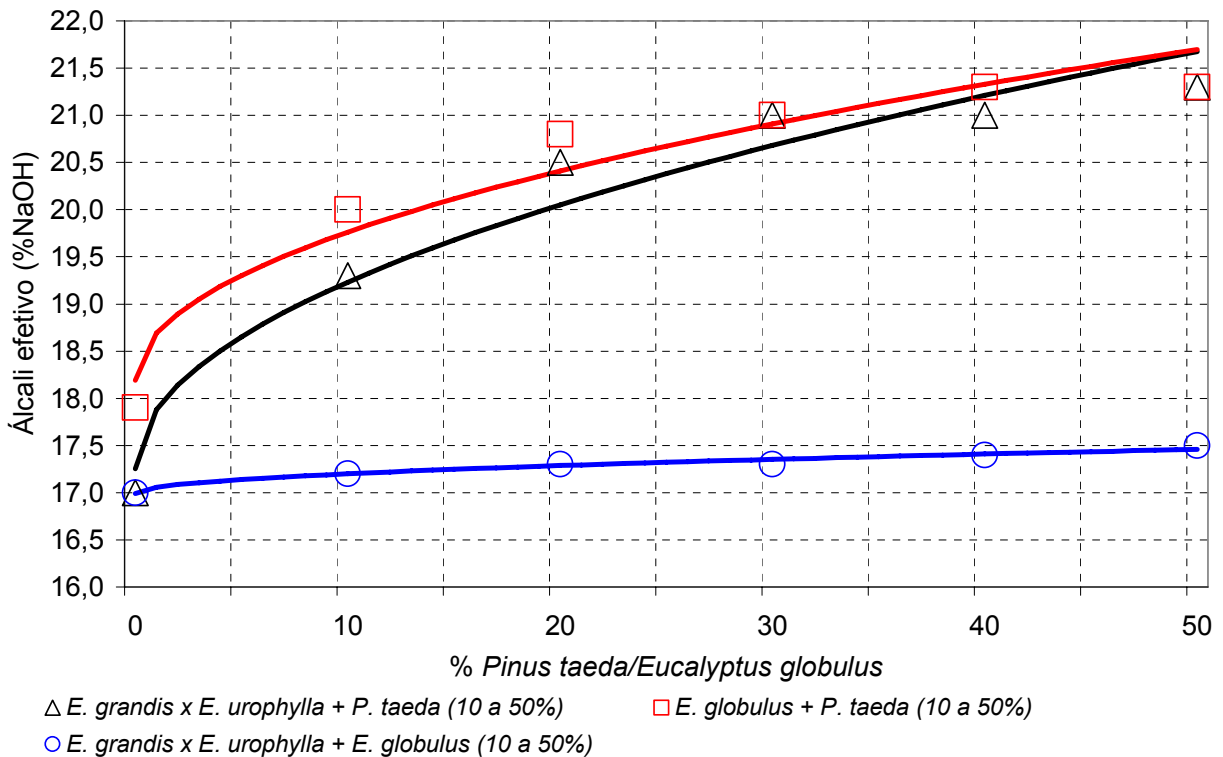


Figura 7 - Álcali efetivo em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

A carga de álcali efetivo para as misturas com o *Pinus taeda* aumentou consideravelmente à medida que este foi adicionado aos *Eucalyptus*. No caso da mistura entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com o *Pinus taeda*, a mistura

com 10% de *Pinus taeda* utilizou 19,3% de álcali efetivo, e a mistura com 50% de *Pinus taeda*, 21,3%. Para a mistura do *Eucalyptus globulus* com o *Pinus taeda*, os valores de álcali efetivo variaram entre 20 e 21,3%.

Nos cozimentos conjuntos entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com o *Eucalyptus globulus* houve uma tendência de aumento do álcali efetivo, porém em outra escala, uma vez que no cozimento dos dois materiais puros, os teores de álcali efetivo necessários para atingir o número kappa objetivo foram próximos. Nas misturas de 10 a 50% de *Eucalyptus globulus* com o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, a variação observada situou-se entre 17,2 e 17,5%.

Foram observados coeficientes de determinação para álcali efetivo em função da porcentagem de *Pinus taeda* e *Eucalyptus globulus* nas misturas de 0,96, 0,95 e 0,97, respectivamente para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com o *Pinus taeda*, o *Eucalyptus globulus* com o *Pinus taeda* e o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com o *Eucalyptus globulus*.

A figura 8 apresenta o fator H utilizado nas misturas avaliadas neste trabalho.

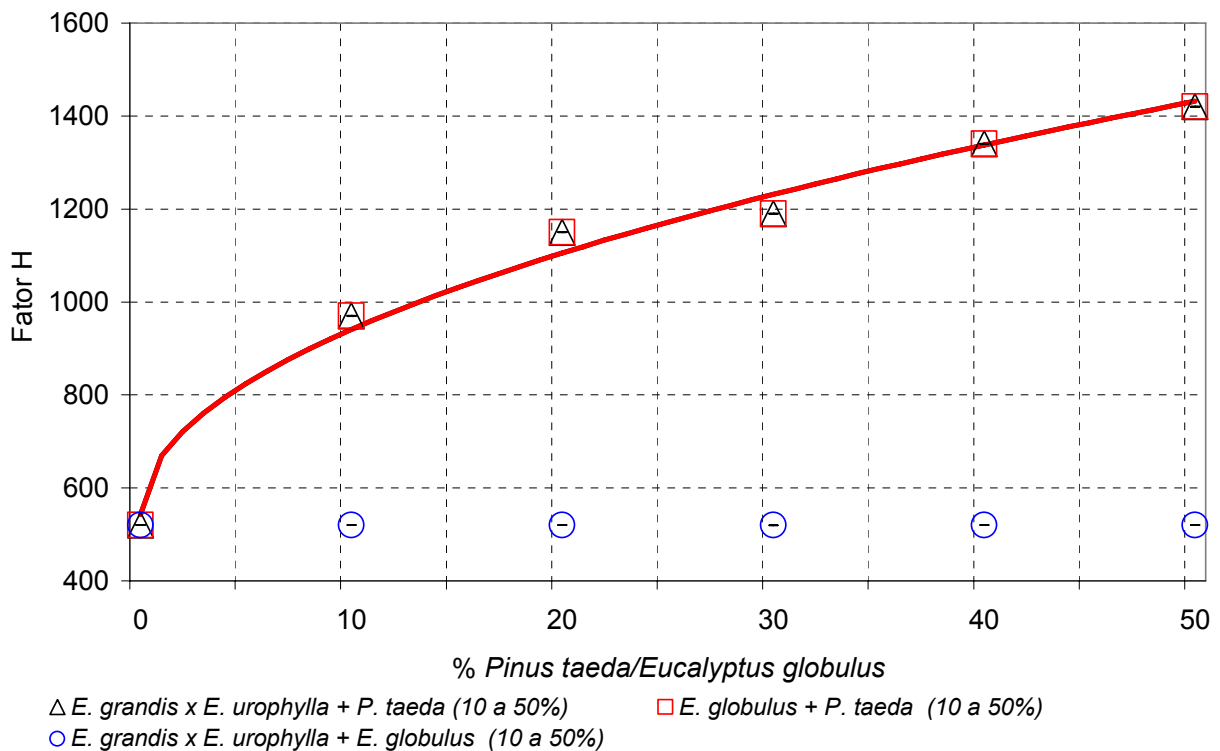


Figura 8 – Fator H em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies



O Fator H, assim como o álcali efetivo, aumentou consideravelmente para as misturas com o *Pinus taeda*, à medida que este foi adicionado aos *Eucalyptus*. Assim, o fator H variou entre 970 a 1420 tanto para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com o *Pinus taeda*, como para a mistura entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda*.

Para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus* o fator H se manteve em 520 para todas as misturas, uma vez que nos cozimentos individuais desses materiais, esse foi o fator H utilizado.

Na figura 9 são apresentados os resultados de rendimento depurado obtidos no estudo.

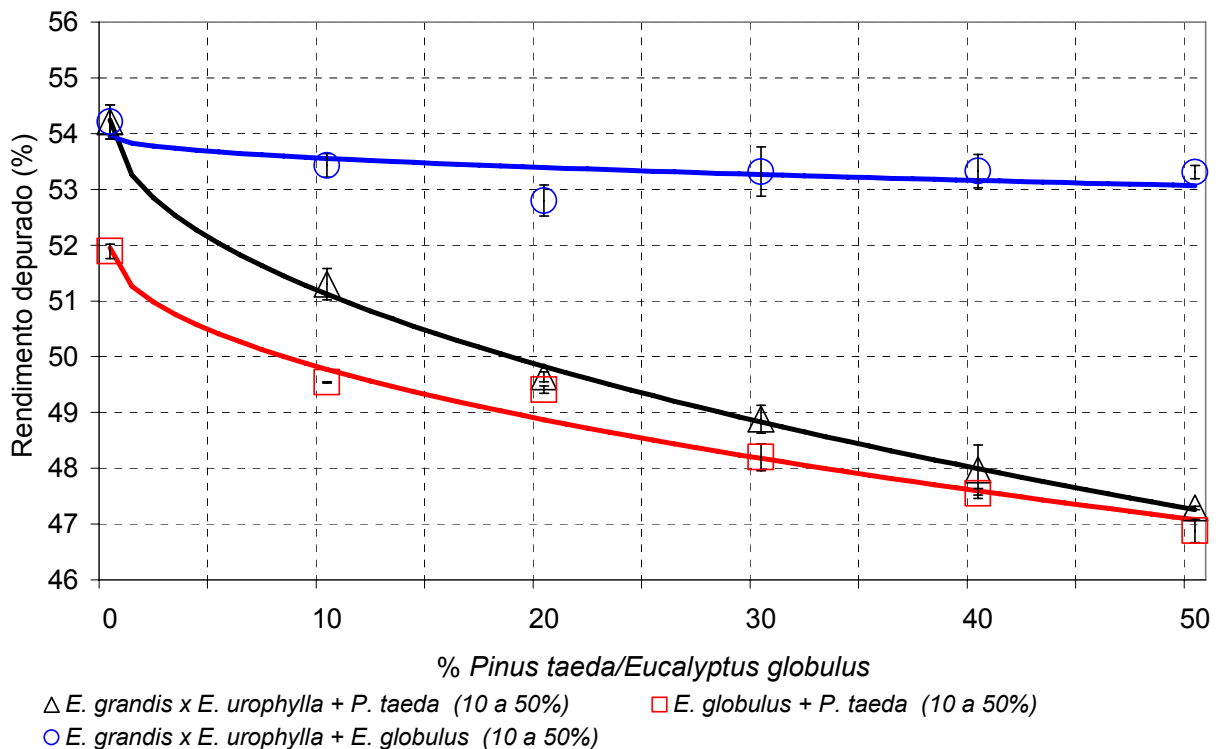


Figura 9 - Rendimento depurado em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

Verifica-se, na figura 9 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%. O coeficiente de determinação observado foi de 0,99 para os rendimentos bruto e depurado. Para essa mistura vale ressaltar que o rendimento do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, quando puro, foi de 54,21%, considerado elevado para o material em questão, o que ocasionou ainda um alto rendimento para a mistura 90% *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com 10% de *Pinus taeda*. Desse modo ocorreu uma redução de 5,4% em rendimento depurado quando se compara o cozimento do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* puro, com a mistura de 90% de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com 10% de *Pinus taeda* e de 12,7% quando se compara o rendimento do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* puro, com a mistura de 50% de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com 50% de *Pinus taeda*.

O mesmo comportamento é observado para a mistura entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda*, ou seja, uma tendência de queda do rendimento depurado, à medida que se adiciona *Pinus taeda* ao *Eucalyptus globulus*. Para essa mistura, entretanto, foram obtidos resultados de rendimentos inferiores a 50% já para a mistura de 90% de *Eucalyptus globulus* com 10% de *Pinus taeda*, mais precisamente, 49,54% para rendimento depurado. O rendimento da mistura com 50% de *Eucalyptus globulus* e 50% de *Pinus taeda*, teve resultados de rendimento depurado de 46,88%. Esses resultados significam reduções de rendimento depurado de 4,53 e 9,66%, respectivamente, ao comparar com o *Eucalyptus globulus* avaliado puro. O coeficiente de determinação observado foi de 0,96 para o rendimento bruto, e de 0,97 para o rendimento depurado.

Ressalta-se que no caso da adição de diferentes proporções de cavacos de *Eucalyptus* a cavacos de *Pinus*, previamente ao processo de polpação, um aumento significativo de rendimento em polpa celulósica é esperado, à medida que se aumenta a quantidade de cavacos de *Eucalyptus* na mistura.

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 rendimento ao misturar o *Pinus taeda* em pequenas proporções a diferentes espécies de eucalipto, desde que estas apresentem rendimento em polpa celulósica elevados, como no caso da mistura de 90% de *Eucalyptus grandis* x

*Eucalyptus urophylla* com 10% de *Pinus taeda*, quando o resultado de rendimento depurado obtido foi de 51,3%.

Oliveira, Foelkel e Gomide (1981) citam que o menor teor de lignina nas madeiras de folhosas possibilita uma deslignificação mais rápida, exigindo menores quantidades de produtos químicos e resultando em rendimentos mais elevados que das madeiras de coníferas. Os mesmos autores estudaram a produção de celulose kraft em cozimentos convencionais a partir de misturas de cavacos de madeira de *Pinus strobus* var. *chiapensis* e *Eucalyptus urophylla*. Os maiores rendimentos depurados foram obtidos para os cozimentos convencionais com 100% de cavacos de eucalipto. À medida que se aumentava o teor de madeira de *Pinus* na mistura, o rendimento depurado diminuía sensivelmente.

Chen, Garceau e Kokta (1978) obtiveram resultados semelhantes a Oliveira, Foelkel e Gomide (1981), ao estudar o comportamento do cozimento conjunto de *Picea glauca* e *Populus tremuloides*. Ou seja, o rendimento bruto foi negativamente afetado pelo aumento da porcentagem de *Picea glauca* na mistura.

Para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus* observa-se uma tendência de queda nos rendimentos. Essa queda se deve à diferença entre os materiais quando avaliados puros, que chega a 4,28%, sendo o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* superior em relação ao rendimento em polpa celulósica. Desse modo, foram encontrados valores de rendimento depurado entre 53,43 e 52,80% para as misturas avaliadas.

Na figura 10 pode-se visualizar o comportamento observado para a viscosidade das polpas celulósicas.

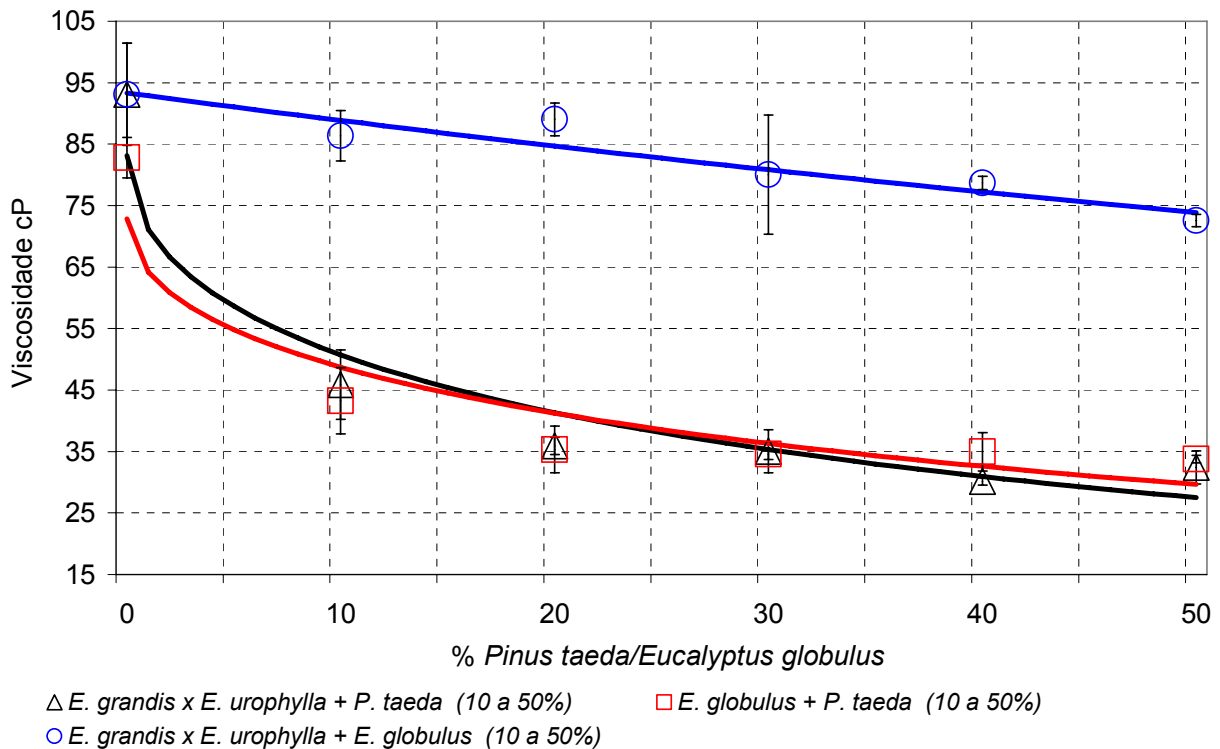


Figura 10 - Viscosidade em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

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*, que representa uma redução de 29,35%. O valor de viscosidade obtido para o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* foi de 93,2cP, o que significa uma redução de viscosidade de 50,65% quando se compara à mistura 90% de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com 10% de *Pinus taeda*. Ao analisar a correlação entre a viscosidade e a porcentagem de *Pinus taeda* na composição da polpa celulósica para a mistura em questão, encontrou-se um coeficiente de determinação de 0,90.

Para as misturas entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda* os valores de viscosidade foram 43,3 e 33,7cP, respectivamente para as misturas de 90% de *Eucalyptus globulus* com 10% de *Pinus taeda*, e 50% de *Eucalyptus globulus* e 50% de

*Pinus taeda*, que representa uma redução de 22,2%. Observa-se um coeficiente de determinação de 0,84.

Em um estudo sobre a produção de celulose kraft a partir de misturas de cavacos de madeira de *Pinus strobus* var. *chiapensis* e *Eucalyptus urophylla*, Oliveira, Foelkel e Gomide (1981), observaram que à medida que aumentava a proporção de cavacos de *Pinus*, a viscosidade das celuloses resultantes diminuía. O autor ressalta que se poderia cometer um erro ao afirmar que as fibras de *Pinus* prejudicavam a viscosidade, uma vez que as viscosidades diminuía à medida que os números kappa das polpas celulósicas aumentavam. Os autores comentam sobre a possibilidade ocorrência de um mascaramento da viscosidade, em razão da presença de um teor relativamente alto de lignina residual nas celuloses. De fato, os números kappa das amostras avaliadas situavam-se entre 33,0 e 66,8. Para o presente trabalho acredita-se que esse mascaramento seja menos importante devido ao fato dos números kappa das misturas situarem-se entre 17,9 e 22,1. Desse modo, pode-se atribuir a queda de viscosidade à participação de *Pinus taeda* nas misturas, pois esse material apresenta um valor de viscosidade de 26,4cP, significativamente inferior às viscosidades dos *Eucalyptus* avaliados. Entretanto, o valor de viscosidade obtido para polpa celulósica de *Pinus taeda* pode ser considerado típico para a espécie em questão, e a comparação de viscosidade de polpas celulósicas de folhosas e coníferas como parâmetro de qualidade pode levar a conclusões errôneas.

Os valores de viscosidade obtidos para as misturas entre as espécies de *Eucalyptus* tiveram um comportamento mais estável, conforme a figura 10, variando entre 86,4 e 72,5cP.

Nas tabelas 16, 17 e 18 podem ser visualizados os valores calculados de teor de sólidos gerados por tonelada de celulose (tss/odt) e o consumo específico de madeira ( $m^3$ /odt) para as misturas avaliadas nesse trabalho.

Tabela 16 - Resultados médios do teor de sólidos/odt e consumo específico de madeira para as misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Pinus taeda</i>		
% <i>Pinus taeda</i>	tss/odt	Consumo específico de madeira (m <sup>3</sup> /odt)
0	1,13	3,67
10	1,29	4,02
20	1,39	4,30
30	1,44	4,54
40	1,48	4,80
50	1,52	5,07
100	1,82	7,00

Tabela 17 - Resultados médios do teor de sólidos/odt e consumo específico de madeira para as misturas entre os materiais *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus globulus</i> + <i>Pinus taeda</i>		
% <i>Pinus taeda</i>	tss/odt	Consumo específico de madeira (m <sup>3</sup> /odt)
0	1,24	3,88
10	1,39	4,20
20	1,41	4,36
30	1,47	4,63
40	1,51	4,88
50	1,54	5,14
100	1,82	7,00

Tabela 18 - Resultados médios do teor de sólidos/odt e consumo específico de madeira para as misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus globulus*, nas proporções de 10 a 50% de *Eucalyptus globulus*

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Eucalyptus globulus</i>		
% <i>Eucalyptus globulus</i>	tss/odt	Consumo específico de madeira (m <sup>3</sup> /odt)
0	1,13	3,67
10	1,16	3,73
20	1,19	3,78
30	1,17	3,75
40	1,17	3,75
50	1,17	3,75
100	1,24	3,88

A análise de variância dos resultados apresentados nas tabelas 16, 17 e 18 pode ser observada nos Apêndice D, E e F.

As tabelas 19, 20 e 21 apresentam um resumo das análises estatísticas para os parâmetros teor de sólidos gerados por tonelada de celulose (tss/odt) e consumo específico de madeira (m<sup>3</sup>/odt); nestas tabelas pode-se visualizar o resultado das análises de variância (significativo ou não), o modelo ajustado, com seus parâmetros a e b e os resultados de correlação obtidos.

Tabela 19 - Resultados da análise estatística para os parâmetros tss/odt e consumo específico de madeira das misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Pinus taeda</i>					
Parâmetro	Anova	Modelo ajustado	a	b	R <sup>2</sup> (%)
tss/odt	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	1,12599	0,056742	99,13
Consumo específico (m <sup>3</sup> /t)	Significativo	$Y = a + bx$	3,7169	0,027357	99,52

Onde: y=parâmetro que se deseja estimar e x=% da matéria-prima na mistura

Tabela 20 - Resultados da análise estatística para os parâmetros tss/odt e consumo específico de madeira das misturas entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus globulus + Pinus taeda</i>					
Parâmetro	Anova	Modelo ajustado	a	b	R <sup>2</sup> (%)
tss/odt	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	1,24211	0,041398	98,29
Consumo específico (m <sup>3</sup> /t)	Significativo	$Y = a + bx$	3,89762	0,024728	99,50

Onde: y=parâmetro que se deseja estimar e x=% da matéria-prima na mistura

Tabela 21 - Resultados da análise estatística para os parâmetros tss/odt e consumo específico de madeira das misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus*

<i>Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla + Eucalyptus globulus</i>					
Parâmetro	Anova	Modelo ajustado	a	b	R <sup>2</sup> (%)
tss/odt	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	1,14016	0,005999	48,65
Consumo específico (m <sup>3</sup> /t)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	3,68968	0,011578	58,44

Onde: y=parâmetro que se deseja estimar e x=% da matéria-prima na mistura

Na figura 11 pode-se visualizar o comportamento das misturas para o parâmetro teor de sólidos gerados por tonelada de celulose (tss/odt).



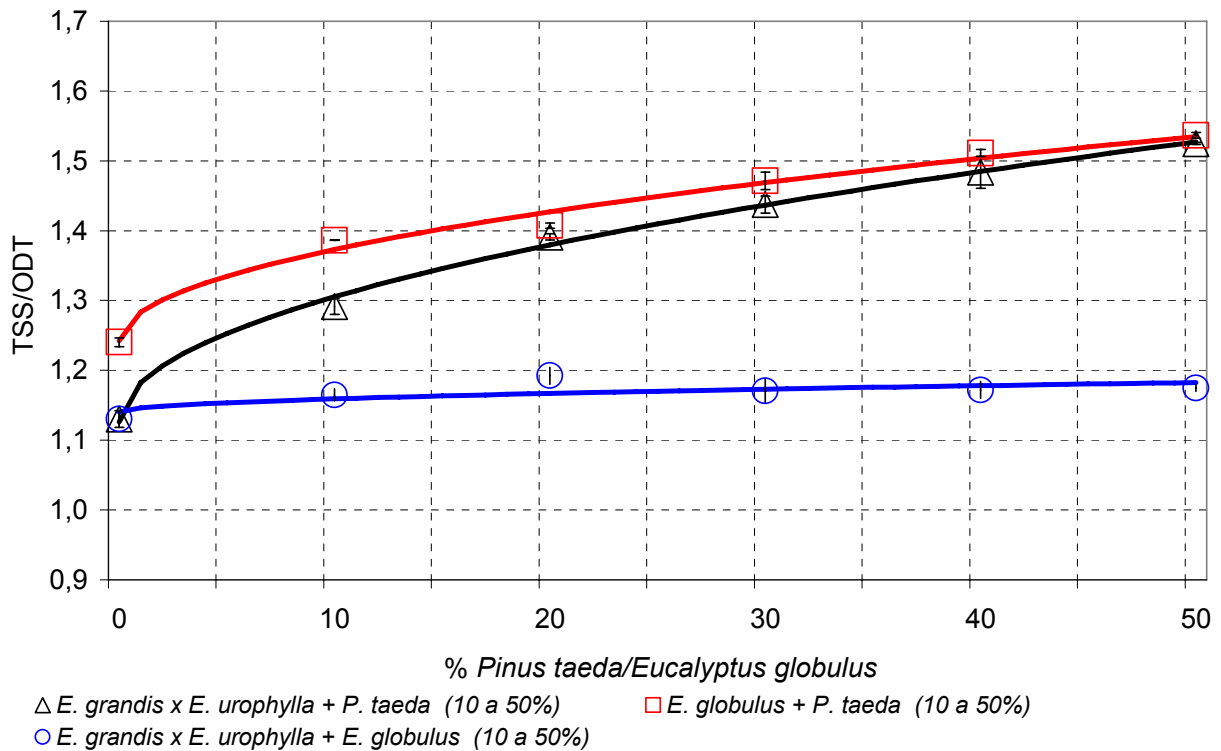


Figura 11 - Teor de sólidos gerados por tonelada de polpa celulósica em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

Verifica-se pela figura 11 uma elevação dos valores de tss/odt com o acréscimo de *Pinus taeda* aos *Eucalyptus*. Esse acréscimo é devido à maior carga alcalina aplicada (maior teor de inorgânicos), e ao menor rendimento em polpa celulósica (maior teor de sólidos), observada nas misturas à medida que o *Pinus taeda* é acrescentado aos *Eucalyptus*.

Os coeficientes de determinação obtidos foram de 0,99 e 0,98, respectivamente para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda* e o *Eucalyptus globulus* com o *Pinus taeda*.

Para a mistura entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus*, os valores de tss/odt permanecem estáveis à medida que o *Eucalyptus globulus* é acrescentado ao *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, sendo que os valores situam-se entre 1,16 e 1,19 tss/odt.

O consumo específico de madeira calculado para as misturas avaliadas nesse trabalho pode ser visualizado na figura 12.

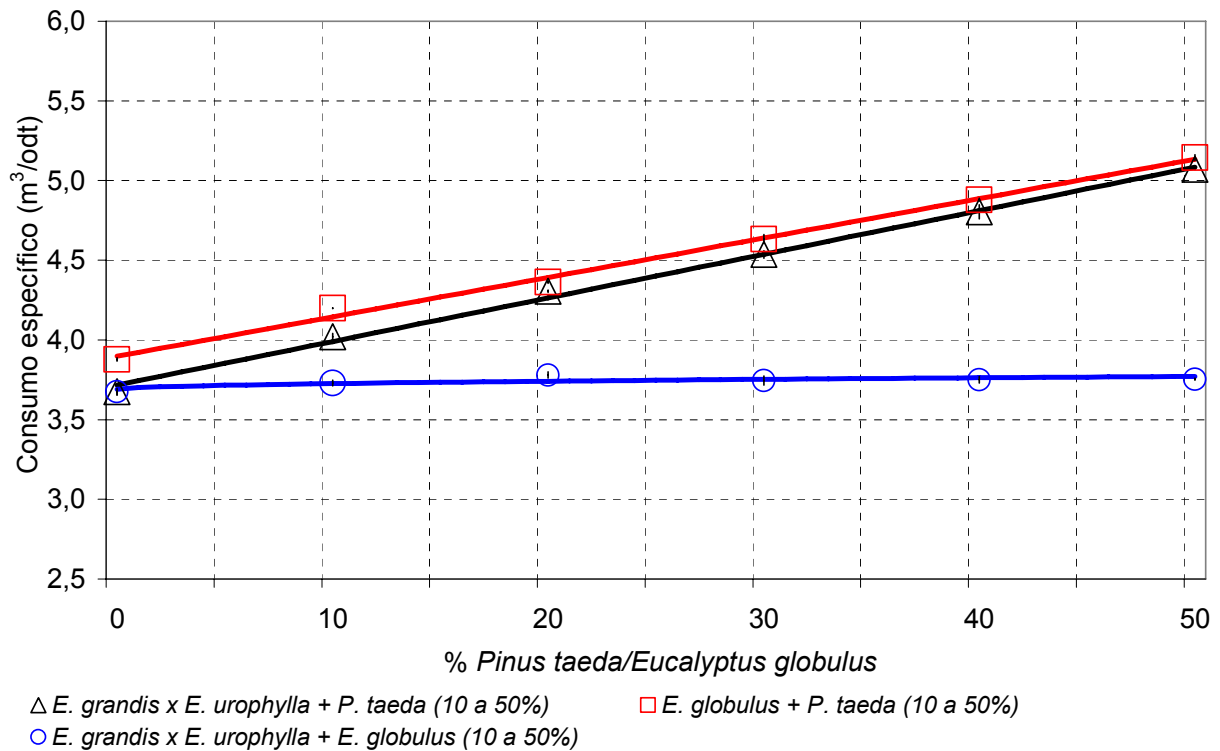


Figura 12 - Consumo específico em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

Uma elevação do consumo específico de madeira é observado à medida que se acrescenta *Pinus taeda* aos *Eucalyptus*, atingindo valores de até 5,07m<sup>3</sup>/odt para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda* e 5,14m<sup>3</sup>/odt para as misturas entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda*. O coeficiente de determinação do modelo ajustado foi de 0,99 para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda* e o *Eucalyptus globulus* com o *Pinus taeda*.

As misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus* apresentam um comportamento estável para o consumo específico de madeira, com valores variando entre 3,73 a 3,78m<sup>3</sup>/odt.

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. Os dados obtidos permitem que se disserte, sobre a mistura de 50% de *Pinus taeda* com 50% de *Eucalyptus*, quando a dosagem de álcali e o fator H utilizado para a polpação do *Pinus taeda* foram, respectivamente 23,5%NaOH

como álcali efetivo e 1500, enquanto para a mistura de 50% de *Pinus taeda*, com 50% de *Eucalyptus*, utilizou-se 21,3% NaOH como álcali efetivo e um fator H de 1420. Os ganhos de rendimento são significativos, uma vez que se passa de um rendimento depurado de 43,04% ao cozinhar o *Pinus taeda*, para valores entre 46,8 e 47,2%, ao adicionar 50% de *Eucalyptus*. A viscosidade da polpa celulósica também aumenta, com a adição de *Eucalyptus*, atingindo valores de até 33,7cP com a adição de 50% de *Eucalyptus*. E, finalmente, os ganhos são concretizados com a redução do consumo específico de madeira, que de 7,0m<sup>3</sup>/odt com a utilização de 100% de *Pinus taeda*, chega a 5,07 ou 5,14 m<sup>3</sup>/odt ao utilizar 50% desta matéria-prima, conforme a espécie de eucalipto utilizada. Todos os ganhos relatados elevarão a competitividade de unidade industrial, pois a produtividade será maior e os custos de matéria-prima (madeira e álcali) serão menores, em função do menor consumo.

### **2.3.3 Composições químicas das polpas celulósicas**

#### **2.3.3.1 Composições químicas das polpas celulósicas das espécies individuais**

Na tabela 22 são apresentados os resultados obtidos para teores de lignina solúvel, insolúvel e total, ácidos hexenurônicos e solubilidade em NaOH a 5% (S5) nas polpas celulósicas obtidas a partir das espécies *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*.

Tabela 22 - Resultados médios de teores de lignina solúvel, insolúvel e total, ácidos hexenurônicos e solubilidade em NaOH 5% - S5 presentes nas polpas celulósicas produzidas a partir dos materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*

Parâmetros	Tratamento	<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Pinus taeda</i>
Lignina solúvel (%)		0,84 a	0,93 a	0,28 b
Lignina insolúvel (%)		2,63 a	1,80 b	3,32 c
Lignina total (%)		3,47 a	2,73 b	3,59 a
Ácidos Hexenurônicos ( $\mu\text{mol/g}$ )		50,41 a	50,50 a	30,35 b
S5 (%)		11,47 a	16,79 b	7,95 c

As médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade

A análise de variância dos resultados de teores de lignina solúvel, insolúvel e total, ácidos hexenurônicos e solubilidade em NaOH 5% - S5 das polpas celulósicas pode ser visualizada no Apêndice G.

De acordo com Montanari et al. (1991), a extensão da deslignificação de um processo pode ser avaliada através da determinação do conteúdo de lignina residual da polpa obtida.

Na figura 13 são apresentados os teores de lignina solúvel, insolúvel e total obtidas nas polpas produzidas a partir do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*.

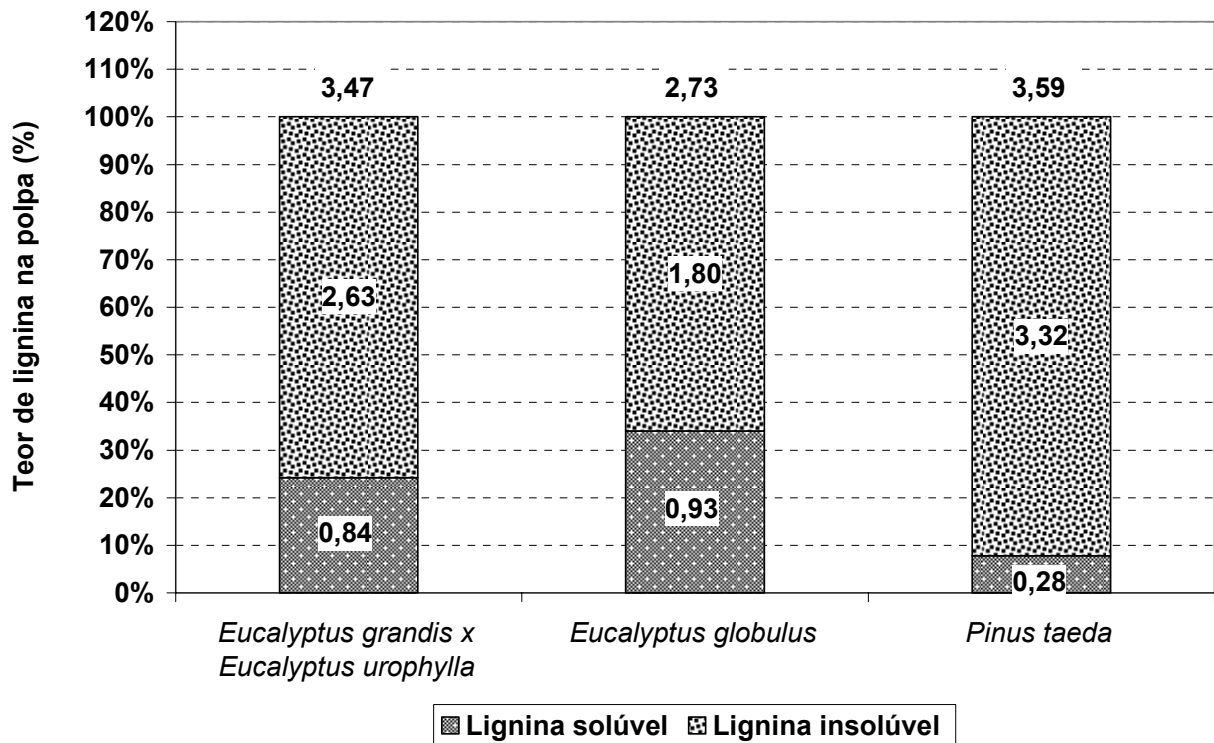


Figura 13 - Teores de lignina solúvel, insolúvel e total nas polpas celulósicas obtidas a partir do *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*

O *Pinus taeda*, quando comparado aos *Eucalyptus*, apresenta um valor inferior de lignina solúvel e superior de lignina insolúvel, respectivamente 0,28 e 3,32%.

A soma dos teores de lignina solúvel e insolúvel confere ao *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla* um teor de lignina total de 3,47%, valor próximo ao encontrado na polpa obtida a partir do *Pinus taeda*, 3,59%. A polpa produzida com o *Eucalyptus globulus* se destaca das demais, apresentando o menor valor observado, de 2,73% de lignina total em sua composição.

Entretanto, para atingir tais níveis de deslignificação, foram necessários distintos valores de álcali efetivo e de fator H. Para o *Pinus taeda*, foi necessária uma carga de álcali efetivo de 23,5%NaOH, como álcali efetivo e um fator H de 1500, enquanto para os *Eucalyptus* utilizou-se 17,0 e 17,9% NaOH como álcali efetivo e 520 de fator H, respectivamente para o *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus globulus*. 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.

Verifica-se, na tabela 22 que as polpas celulósicas obtidas com os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* apresentam diferença estatística quanto aos teores de lignina solúvel, insolúvel e total. A diferença observada no teor de lignina total das polpas produzidas a partir do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e do *Eucalyptus globulus* pode ser, em parte, justificada pela diferença no número kappa entre as polpas celulósicas, que por sua vez está relacionado à carga alcalina e ao fator H aplicados; sendo o número kappa da polpa de *Eucalyptus globulus*, 17,2, ligeiramente inferior ao da polpa do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, 17,9.

A partir dos resultados de teores de lignina na polpa, pode-se esperar uma maior facilidade no branqueamento da polpa celulósica de *Eucalyptus globulus*, pois esta além de possuir o menor teor de lignina total, apresenta 34,15% de sua lignina total representada pela lignina solúvel, que é mais facilmente extraída nos processos de branqueamento.

Almeida (2003) aplicou diferentes cargas alcalinas a dois híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e obteve números kappa de 17,07 e 17,98. Para esse nível de deslignificação, foram observados valores de 0,57 e 0,26% de lignina solúvel, 1,87 e 1,81% de lignina insolúvel e 2,44 e 2,07% de lignina total.

De acordo com Gomide e Fantuzzi Neto (2000), para preservação de rendimento, a polpação kraft de madeira de *Eucalyptus grandis* deve ser interrompida, quando a deslignificação atingir número kappa de 17 a 18, correspondendo à cerca de 1,5 a 2,0% de lignina total residual na polpa. No presente estudo, os valores observados são superiores aos mencionados por esse autor, apesar do número kappa praticado ser similar.

Costa, Mounteer e Colodette (2001) citam que os ácidos hexenurônicos são formados durante a polpação alcalina pela modificação de ácidos 4-O metilglicurônicos, presentes nas xilanas. As condições de polpação que mais influenciam o conteúdo de ácidos hexenurônicos na polpa são: álcali ativo, sulfidez e temperatura. Os ácidos hexenurônicos protegem as xilanas contra a reação de despolimerização terminal e,

portanto, sua presença na polpa preserva o rendimento em etapas alcalinas. Todavia, as ligações duplas conjugadas na estrutura dos ácidos hexenurônicos influenciam o processo de branqueamento da polpa. Os ácidos hexenurônicos formam ligações covalentes com a lignina, consomem reagentes químicos eletrofilicos de branqueamento (cloro, dióxido de cloro, ozônio e perácidos), ligam-se a íons metálicos, causam reversão de alvura de polpas branqueadas e são uma fonte de ácido oxálico. Este último é gerado quando os ácidos hexenurônicos são oxidados durante a operação de branqueamento. Os mesmos autores citam ainda que polpas de fibra curta contêm maior quantidade de xilanas, e, portanto, de ácidos hexenurônicos do que polpas de fibra longa.

Os resultados obtidos para teor de ácidos hexenurônicos nas polpas avaliadas neste trabalho podem ser visualizados na figura 14.

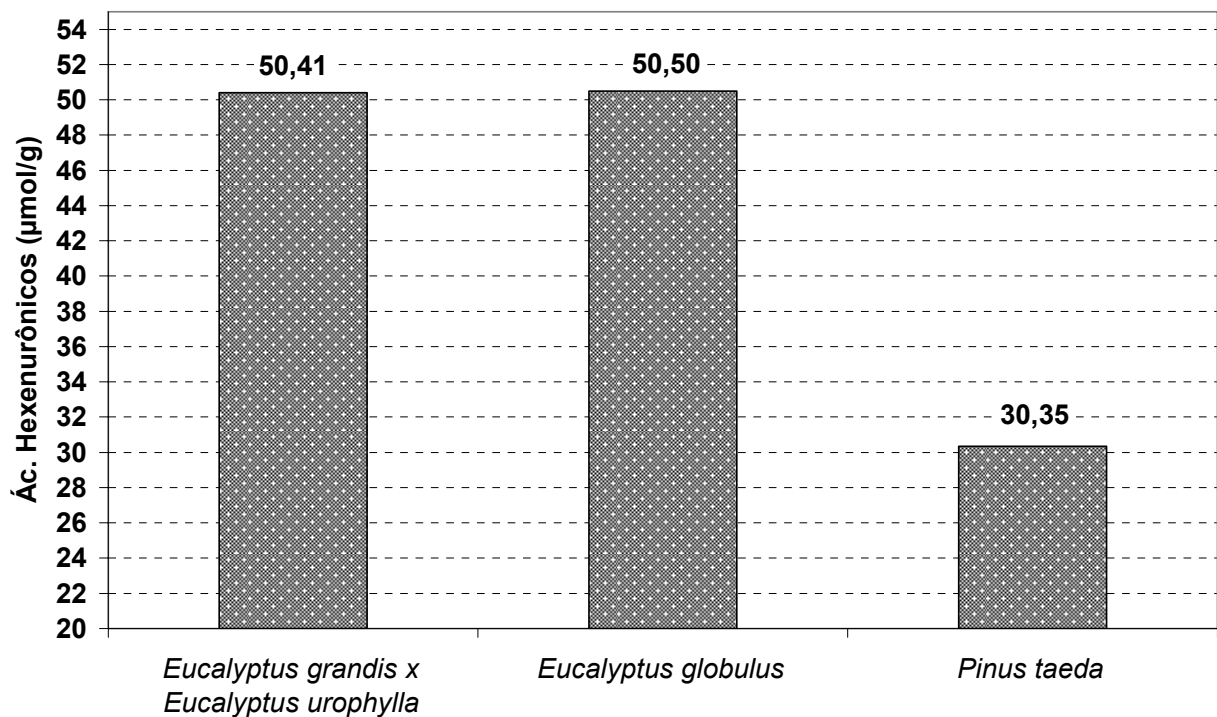


Figura 14 - Teor de ácidos hexenurônicos das polpas celulósicas obtidas a partir do *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*

Conforme a tabela 22 verifica-se diferença estatística para teor de ácidos hexenurônicos entre as polpas produzidas, sendo que a polpa obtida a partir do *Pinus*

*taeda* difere das polpas obtidas a partir de *Eucalyptus*, mas estas não diferem entre si. Proporcionalmente pode-se dizer que a polpa de *Pinus taeda*, com 30,35 $\mu$ mol/g de ácidos hexenurônicos em sua composição, apresenta aproximadamente 40% a menos de ácidos hexenurônicos quando comparada com as polpas de *Eucalyptus globulus* e com a polpa do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, que apresentam respectivamente 50,50 e 50,41 $\mu$ mol/g de ácidos hexenurônicos. Estes resultados confirmam diversas observações encontradas na literatura a respeito do menor teor de ácidos hexenurônicos em polpas celulósicas de fibra longa, quando comparadas com polpas celulósicas de fibra curta.

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 celulósicas de fibra curta apresentaram 50% a mais de ácidos hexenurônicos que as de fibra longa, produzidas sob as mesmas condições de polpação kraft.

Daniel et al. (2003) cita que o teor de ácidos hexenurônicos na polpa de *Eucalyptus globulus* aumenta durante a polpação, até que a deslignificação atinja cerca de 95%, comportamento diferente daquele reportado para coníferas. Os autores realizaram um estudo e concluíram que a diferença observada nas etapas de formação/degradação de ácidos hexenurônicos durante a polpação kraft de *Eucalyptus globulus* e coníferas não podem ser atribuídas às diferenças na estrutura química das xilanas. Entretanto, podem ser causadas pela diferença nas condições de polpação, que são bem mais amenas para *Eucalyptus globulus*, uma vez que a taxa de formação/degradação é dependente da concentração de OH<sup>-</sup> e HS<sup>-</sup>. Assim, a carga mais baixa de álcali nos licores de polpação de folhosas, quando comparado com coníferas pode explicar a predominância de formação de ácidos hexenurônicos durante a polpação de *Eucalyptus globulus*. Não deve ser deixado de lado, entretanto as diferenças entre folhosas e coníferas em termos de acessibilidade da lignina e polissacarídeos. Ambas as possibilidades necessitam de investigação.



Almeida (2003) encontrou teores de ácidos hexenurônicos de 49,17 e 50,43 $\mu$ mol/g em polpas celulósicas produzidas com híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com números kappa de 17,07 e 17,98.

Daniel et al. (2003) avaliou a influência de condições de polpação de *Eucalyptus globulus* e encontrou valores de ácidos hexenurônicos entre aproximadamente 44 e 56meq/kg de polpa para números kappa entre 11,6 e 17,7.

Gellerstedt e Li (1996) reportam valores entre 14 e 24 $\mu$ mol/g de ácidos hexenurônicos em polpas celulósicas de pinus não branqueadas, com número kappa entre 18 e 18,6. Chai, Yoon e Li (2001a) avaliaram o teor de ácidos hexenurônicos em uma polpa celulósica de *Pinus taeda* e obtiveram valores de cerca de 40mmol/kg de polpa para número kappa de aproximadamente 80.

Com base nas citações anteriores, os resultados obtidos no presente trabalho, para teores de ácidos hexenurônicos podem ser considerados típicos para as espécies estudadas.

Desde a descoberta que o teor de lignina klason da polpa se relacionava linearmente com o valor do número kappa, o controle dos processos de cozimento e branqueamento tem como uma de suas principais ferramentas de controle de processo esta variável. Entretanto, foi demonstrado que os ácidos hexenurônicos contribuem significativamente na determinação do número kappa, principalmente, para polpa de fibra curta, porque as cadeias de xilanas contendo ácidos hexenurônicos reagem com o permanganato de potássio sob as condições do teste (GELLERSTEDT; LI, 1996; LI; GELLERSTEDT, 1997).

Li e Gellerstedt (1997) encontraram uma relação linear entre o número kappa e o teor de ácidos hexenurônicos, na qual 0,84 unidade de número kappa equivale a 10 $\mu$ mol/g de ácidos hexenurônicos. Essa contribuição dos ácidos hexenurônicos no número kappa pode ser expressa como número kappa equivalente ou corrigido. Os autores comentam que a contribuição dos ácidos hexenurônicos para o valor do número kappa é maior em polpa de fibra curta (até 6 unidades de número kappa) do que em polpa de fibra longa (até 3 unidades de número kappa).

A partir da referência de Li e Gellerstedt (1997), na qual uma unidade de número kappa equivale a 11,9mmol de ácidos hexenurônicos foram calculados o número kappa

corrigido para as polpas celulósicas produzidas a partir dos materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*, conforme a figura 15.

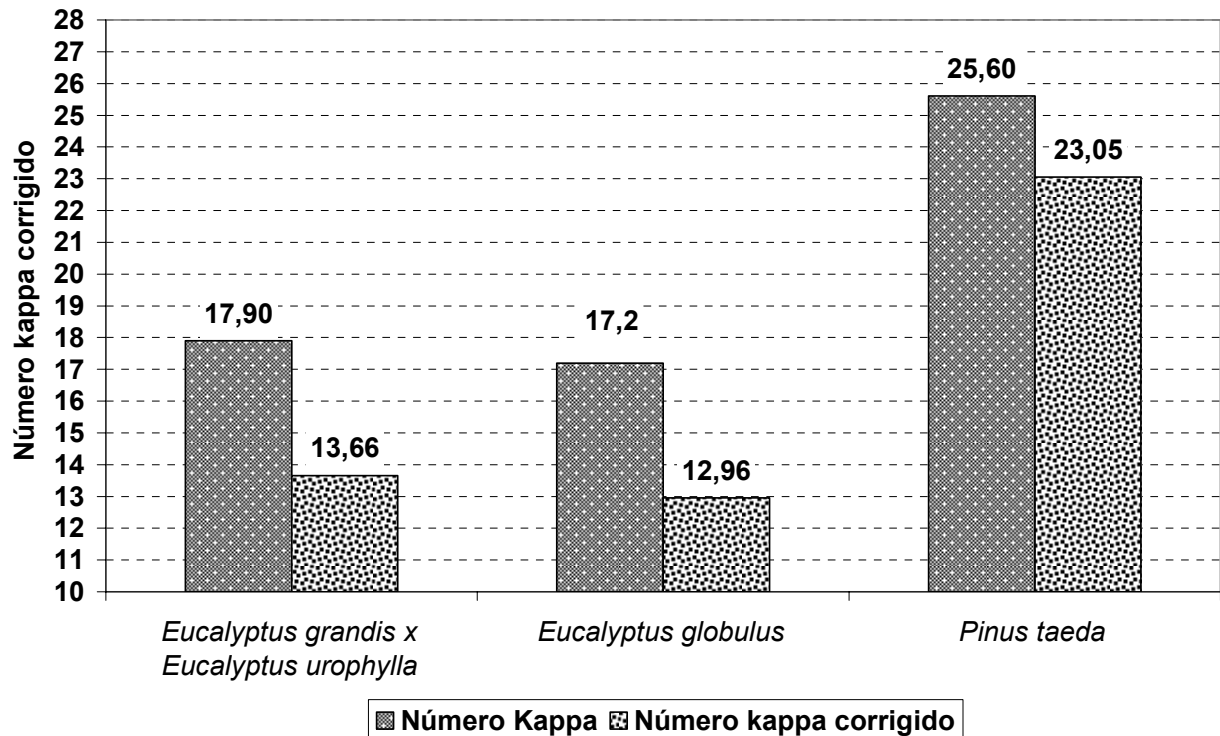


Figura 15 – Número kappa corrigido das polpas celulósicas produzidas a partir do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*

Na figura 15 verifica-se a diferença entre os números kappa obtidos após as análises de polpação e o número kappa corrigido. Foram obtidas reduções de 4,24 pontos de kappa para os *Eucalyptus* e 2,55 pontos para o *Pinus taeda*, que correspondem a 23,7, 24,7 e 10% de redução, respectivamente, para as polpas celulósicas produzidas a partir do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*. As diferenças observadas evidenciam a importância da quantificação dos ácidos hexenurônicos na definição de estratégias tanto de polpação como de branqueamento de polpa celulósica.

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. No processo de refino

a polpa recebe um tratamento mecânico, o qual causa a remoção da parede primária das fibras e permite a hidratação das mesmas, aumentando com isso a flexibilidade, o poder de ligação das fibras e, conseqüentemente, as propriedades de resistência física do papel.

Uma maneira de expressar o teor de hemiceluloses presentes na polpa, representada em polpas de eucalipto principalmente pelas xilanas, é através das análises de solubilidade em NaOH 5% (S5). Os resultados de S5 obtidos nas polpas de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* são apresentados na figura 16.

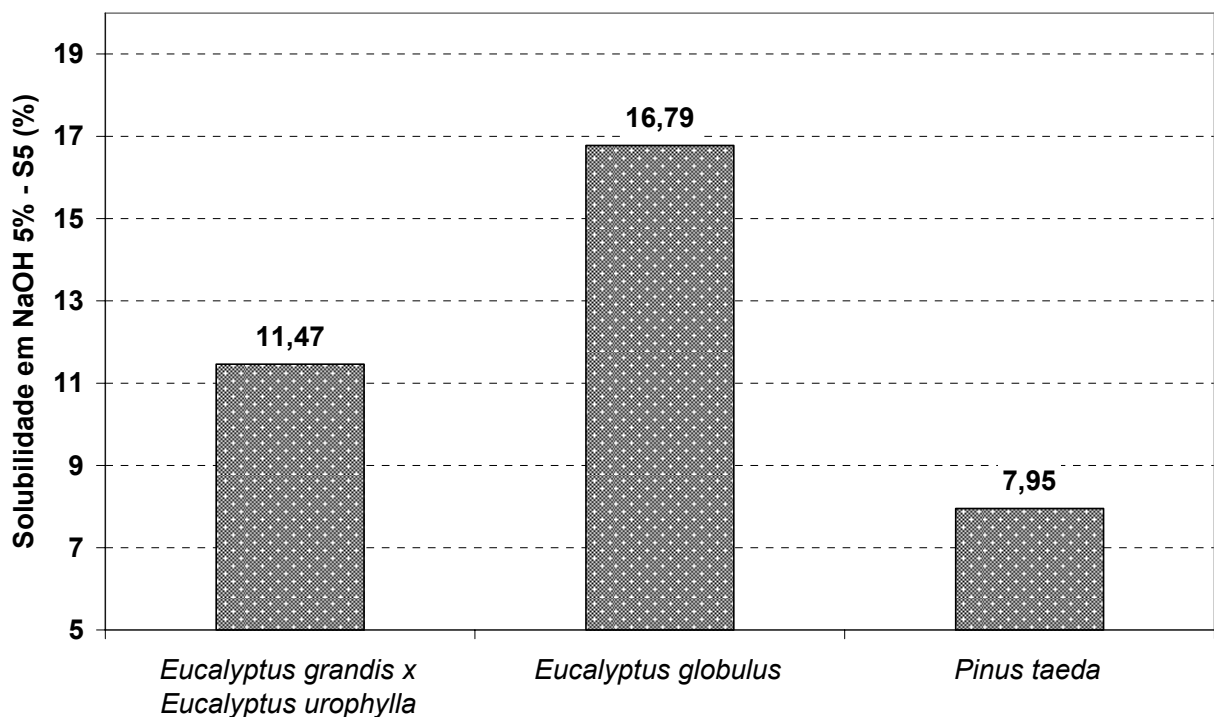


Figura 16 - Solubilidade em NaOH 5% das polpas celulósicas obtidas a partir do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*

Os resultados obtidos para solubilidade em NaOH 5% (S5), demonstram variação entre as polpas avaliadas e estes apresentam diferença estatística entre si.

Os valor de S5 obtido na polpa celulósica de *Eucalyptus globulus* demonstra que é possível obter melhores rendimentos a partir desse material, através de otimizações das condições do processo de polpação Lo-solids<sup>®</sup>, como perfil de álcali, temperatura e

teor de sólidos. Otimizações das variáveis de polpação, visando a preservação de rendimento, podem ser realizadas também para o *Pinus taeda*.

Cardoso et al. (2002), estudou polpas kraft originadas de madeiras de *Eucalyptus globulus* com níveis diferentes de teor de lignina – 20,53 e 23,02%, submetidas a três níveis de temperatura e três condições de carga alcalina. Foram obtidos resultados de S5 entre 12,4 e 14,9%. A partir desses resultados foram ajustados modelos, através dos quais foi possível traçar um comportamento para o parâmetro S5. Para os dois níveis de teor de lignina na madeira estudados, o comportamento foi semelhante, sendo que o teor de S5 aumenta com o aumento da temperatura de cozimento. Isso porque nas condições do estudo, para as maiores temperaturas se aplicavam menores cargas alcalinas, para se alcançar mesmo número kappa. Contudo, para o teor mais baixo de lignina, a carga alcalina aplicada pode ser menor para se chegar ao mesmo S5. O maior valor de S5 obtido foi de aproximadamente 15,2%, a 171°C para kappa 19, o que se deve à utilização de menores valores de álcali ativo para se obter o mesmo número kappa. Para híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, Almeida (2003) obteve valores de S5 de 12,17 e 11,87%, para número kappa de aproximadamente 17. Com base nas citações anteriores os valores de S5 obtidos neste trabalho estão consoantes com resultados obtidos por outros autores.

#### **2.3.3.2 Composições químicas das polpas celulósicas das misturas entre *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Pinus taeda* e *Eucalyptus globulus***

Nas tabelas 23, 24 e 25 são apresentados os resultados obtidos nesse estudo, para teores de lignina solúvel, insolúvel e total, ácidos hexenurônicos e a solubilidade em NaOH 5% (S5) nas polpas celulósicas produzidas a partir das misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda*, o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda* e o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus*.

Tabela 23 - Resultados médios de teores de: lignina solúvel, insolúvel e total, ácidos hexenurônicos e solubilidade em NaOH 5% (S5) na polpa celulósica para as misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Pinus taeda</i>					
% <i>Pinus taeda</i>	Lignina solúvel (%)	Lignina insolúvel (%)	Lignina total (%)	Ácidos hexenurônicos (µmol/g)	S5 (%)
0	0,84	2,63	3,47	50,41	11,47
10	0,58	1,98	2,56	56,06	11,27
20	0,39	2,63	3,02	51,25	10,27
30	0,54	2,16	2,70	39,57	9,55
40	0,47	3,31	3,78	40,97	9,43
50	0,43	3,50	3,93	43,49	9,16
100	0,28	3,32	3,59	30,35	7,95

Tabela 24 - Resultados médios de teores de: lignina solúvel, insolúvel e total, ácidos hexenurônicos e solubilidade em NaOH 5% (S5) na polpa celulósica para as misturas entre os materiais *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus globulus</i> + <i>Pinus taeda</i>					
% <i>Pinus taeda</i>	Lignina solúvel (%)	Lignina insolúvel (%)	Lignina total (%)	Ácidos Hexenurônicos (µmol/g)	S5 (%)
0	0,93	1,80	2,73	50,50	16,79
10	0,57	3,31	3,88	56,59	14,71
20	0,47	3,09	3,56	55,68	12,89
30	0,54	2,75	3,28	50,03	12,95
40	0,46	3,30	3,75	47,76	12,26
50	0,49	3,05	3,54	42,62	11,40
100	0,28	3,32	3,59	30,35	7,95

Tabela 25 - Resultados médios de teores de: lignina solúvel, insolúvel e total, carboidratos, ácidos hexenurônicos e solubilidade em NaOH 5% (S5) na polpa celulósica para as misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus globulus*, nas proporções de 10 a 50% de *Eucalyptus globulus*

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Eucalyptus globulus</i>					
% <i>Eucalyptus globulus</i>	Lignina solúvel (%)	Lignina insolúvel (%)	Lignina total (%)	Ácidos hexenurônicos (µmol/g)	S5 (%)
0	0,84	2,63	3,47	50,41	11,47
10	0,71	2,13	2,84	52,83	12,53
20	1,08	1,92	2,99	50,31	12,70
30	0,71	2,61	3,32	50,92	14,00
40	0,71	2,56	3,26	47,94	13,79
50	1,27	1,69	2,96	47,15	15,34
100	0,93	1,80	2,73	50,5	16,79

As tabelas 26, 27 e 28 apresentam um resumo das análises estatísticas das principais características químicas das polpas celulósicas avaliadas nesse trabalho. Nelas podem-se visualizar os resultados das análises de variância (significativo ou não), o modelo ajustado, com seus parâmetros a e b e os resultados de correlação obtidos. A análise de variância dos resultados de teores de lignina solúvel, insolúvel e total, carboidratos, ácidos hexenurônicos e solubilidade em NaOH 5% (S5) das polpas celulósicas pode ser visualizada nos Apêndices H, I e J.

Tabela 26 - Resultados da análise estatística para teores de lignina, ácidos hexenurônicos e S5 presentes nas polpas celulósicas das misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Pinus taeda</i>					
Parâmetro	Anova	Modelo ajustado	a	b	R <sup>2</sup>
Lignina solúvel (%)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	0,783871	-0,0550594	74,86
Lignina insolúvel (%)	Significativo	$Y = a + bx$	2,13798	0,0225143	40,15
Lignina total (%)	Significativo	$Y = a + bx$	2,8381	0,0161429	22,62
Ác.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

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

Tabela 27 - Resultados da análise estatística para teores de lignina, ácidos hexenurônicos e S5 presentes nas polpas celulósicas das misturas entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus globulus</i> + <i>Pinus taeda</i>					
Parâmetro	Anova	Modelo ajustado	a	b	R <sup>2</sup>
Lignina solúvel (%)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	0,855965	-0,0630691	75,29
Lignina insolúvel (%)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	2,16062	0,162929	47,75
Lignina total (%)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	3,01678	0,0998517	31,96
Ác.Hexenurônico (µmol/g)	Significativo	$Y = \exp(a + bx)$	4,04393	-0,0047829	57,37
S5 (%)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	16,8027	-0,74796	96,90

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

Tabela 28 - Resultados da análise estatística para teores de lignina, ácidos hexenurônicos e S5 presentes nas polpas celulósicas das misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus*

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Eucalyptus globulus</i>					
Parâmetro	Anova	Modelo ajustado	a	b	R <sup>2</sup>
Lignina solúvel (%)	Não significativo	-	-	-	-
Lignina insolúvel (%)	Não significativo	-	-	-	-
Lignina total (%)	Não significativo	-	-	-	-
Ác.Hexenurônico (µmol/g)	Significativo	$Y = 1/(a + bx)$	0,0190548	0,0000381	47,04
S5 (%)	Significativo	$Y = \exp(a + bx)$	2,45256	0,0052463	92,05

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

Para permitir uma melhor visualização e interpretação dos dados apresentados nas tabelas 23, 24 e 25 os resultados das misturas foram plotados juntos. O eixo das ordenadas representa a porcentagem de *Pinus taeda* nas misturas com o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e com o *Eucalyptus globulus*, e também a porcentagem do *Eucalyptus globulus* nas misturas com o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

Nas figuras 17, 18 e 19 são apresentados os resultados para teores de lignina solúvel, insolúvel e total das misturas avaliadas.



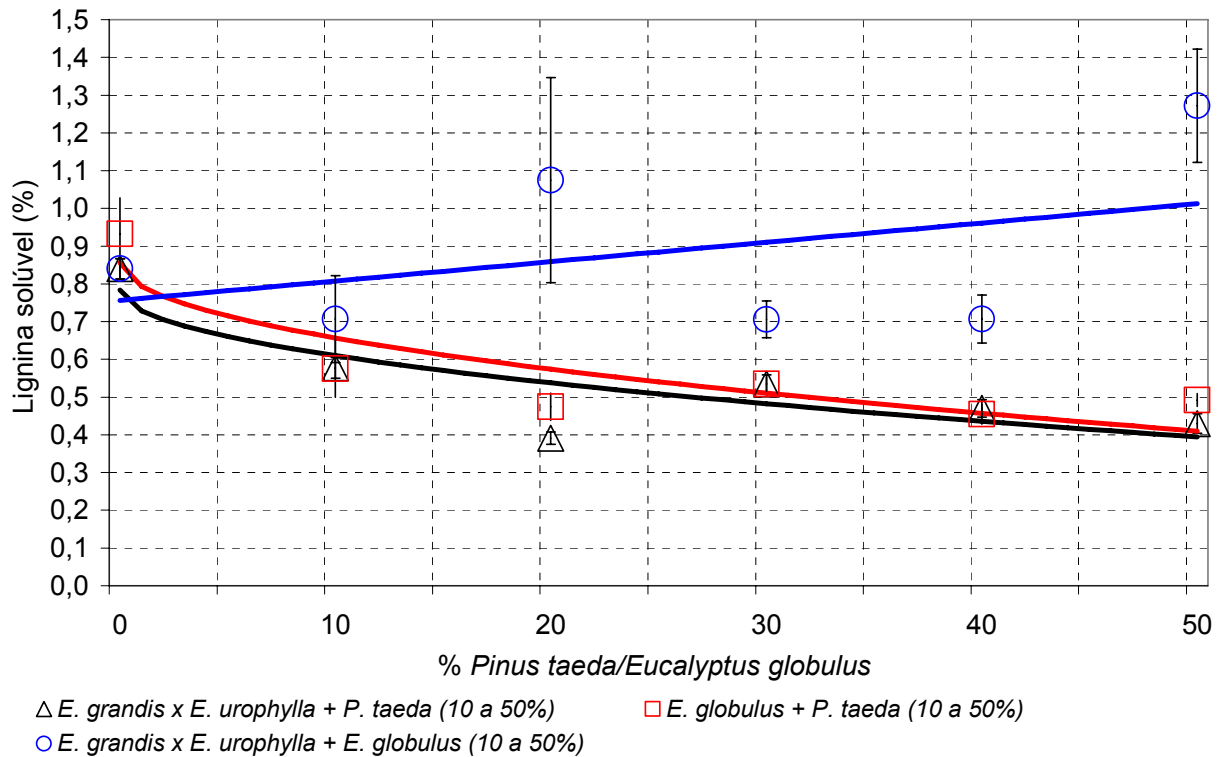


Figura 17 - Teor de lignina solúvel em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

Para lignina solúvel é observado um comportamento semelhante entre as misturas de *Pinus taeda* com *Eucalyptus*. Desse modo, observa-se uma tendência de queda no teor de lignina solúvel, à medida que se adiciona *Pinus taeda* aos *Eucalyptus*. Esse comportamento é explicado pela acentuada diferença de lignina solúvel do *Pinus taeda* em relação aos *Eucalyptus* e pode impactar negativamente as operações de braqueamento.

Para a mistura entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus* nota-se uma tendência de aumento da lignina solúvel ao adicionar *Eucalyptus globulus* ao *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Vale ressaltar que os valores de lignina solúvel obtidos para esses materiais apresentaram valores similares, respectivamente 0,84 e 0,93%.

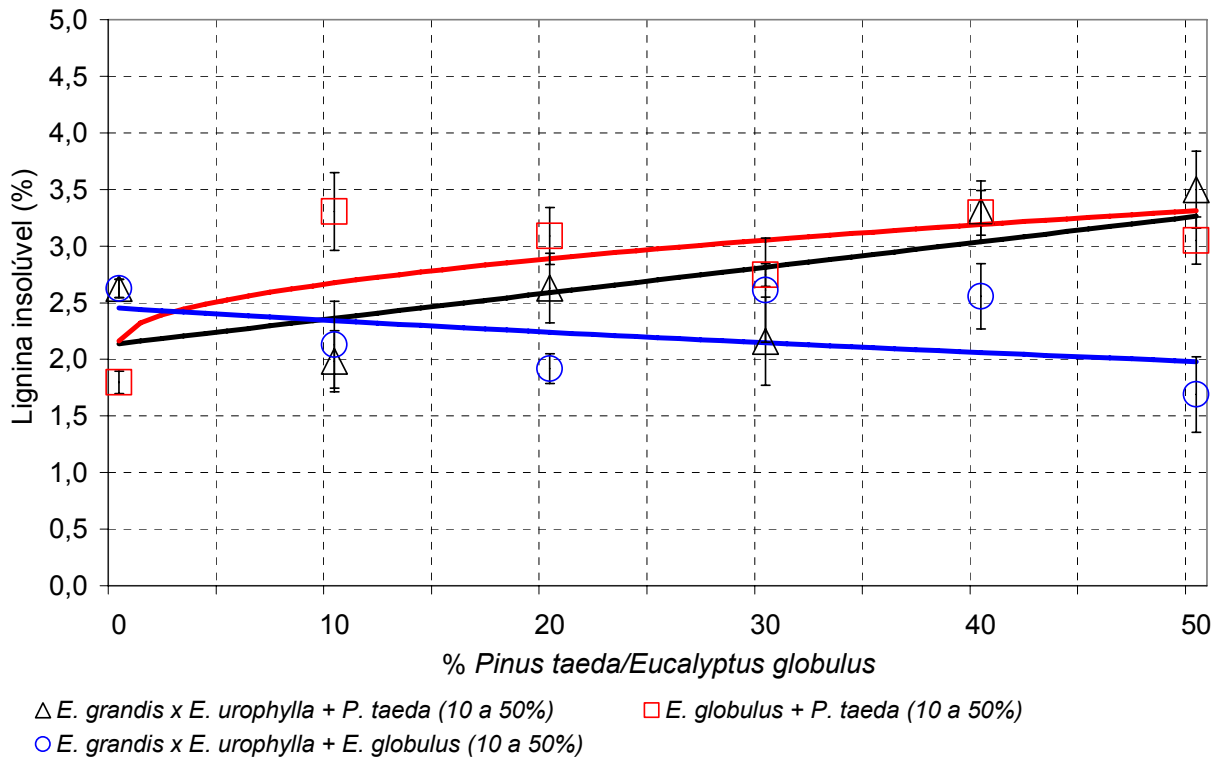


Figura 18 - Teor de lignina insolúvel em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

Conforme a figura 18 observa-se uma tendência de aumento do teor de lignina insolúvel à medida que se adiciona *Pinus taeda* aos *Eucalyptus*. Na mistura entre os *Eucalyptus*, verifica-se uma tendência de queda no teor de lignina insolúvel, visto que esse teor é mais baixo para o *Eucalyptus globulus*. Logo, o resultado obtido com as misturas está de acordo com os valores obtidos individualmente, para cada material avaliado.

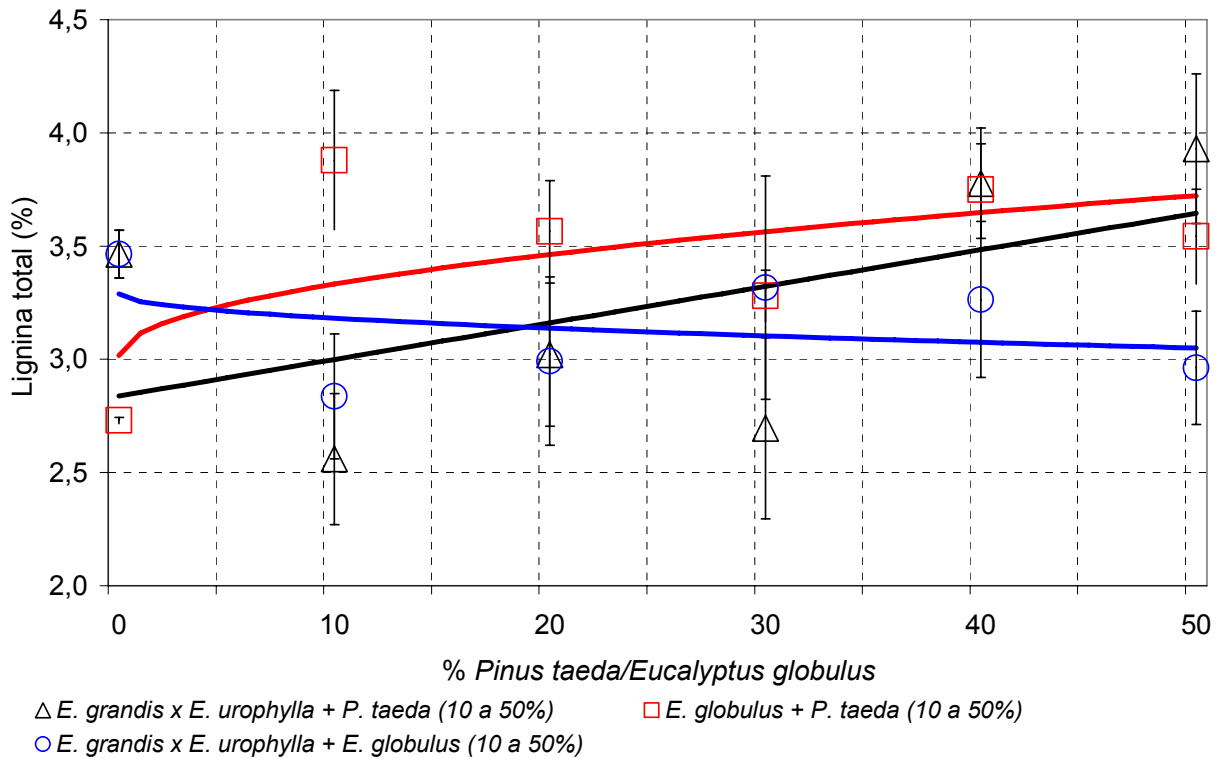


Figura 19 - Teor de lignina total em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

Os valores de lignina total seguem a mesma tendência da lignina insolúvel, ou seja, sofrem um acréscimo à medida que o *Pinus taeda* é adicionado aos *Eucalyptus*. Foram observados valores entre 2,56 e 3,93% nas misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda*, 3,28 e 3,88% nas misturas entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda* e 2,84 e 3,32% para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus*. O aumento do teor de lignina na polpa das misturas entre os *Eucalyptus* e o *Pinus taeda* pode ser justificada pela estratégia utilizada no trabalho, de aumento progressivo do número kappa à medida que a proporção de *Pinus taeda* aumenta nas misturas.

Na figura 20 pode-se visualizar o comportamento observado para teores de ácidos hexenurônicos.

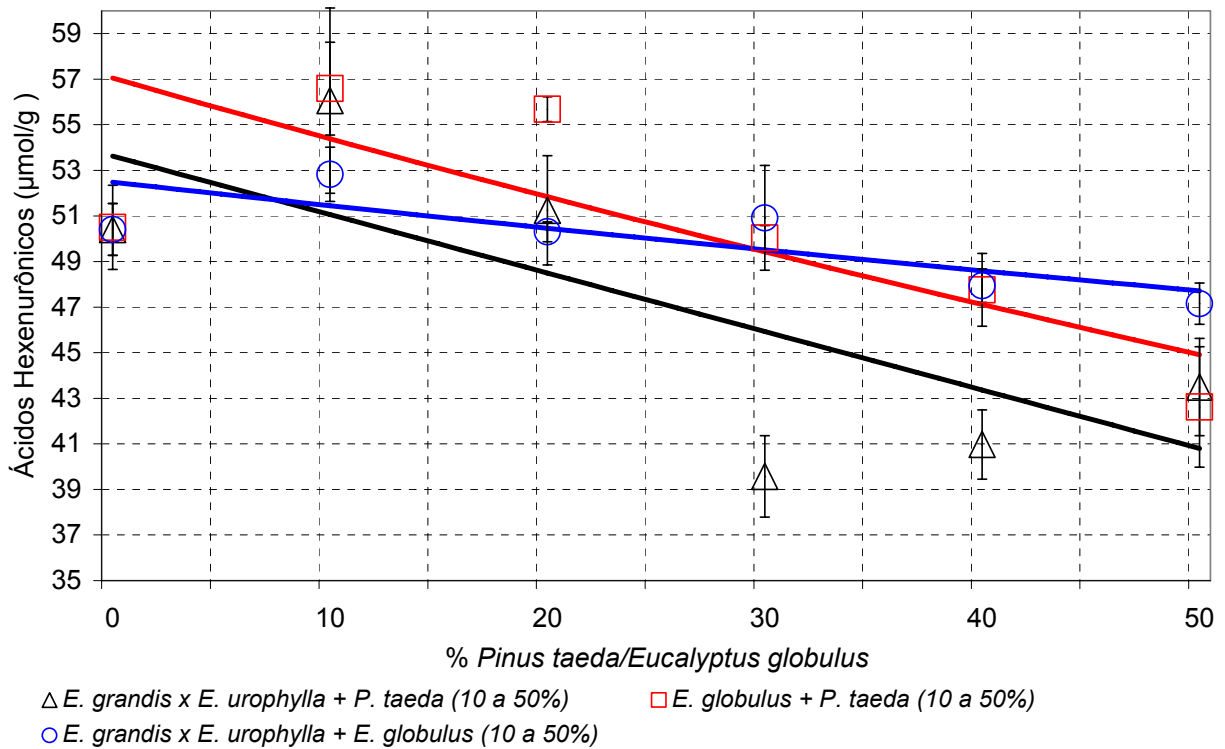


Figura 20 - Teor de ácidos hexenurônicos em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

Pela figura 20, nota-se que à medida que se acrescenta *Pinus taeda* aos *Eucalyptus*, o teor de ácidos hexenurônicos decresce, sendo que a mistura entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda* apresenta valores inferiores de ácidos hexenurônicos, para todas as proporções avaliadas, quando se compara à mistura do *Eucalyptus globulus* com o *Pinus taeda*.

Para a mistura entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus*, observa-se uma tendência de estabilidade no teor de ácidos hexenurônicos, com valores variando entre 52,83 a 47,15µmol/g.

Na figura 21 são apresentados os comportamentos das misturas para solubilidade em NaOH a 5%.

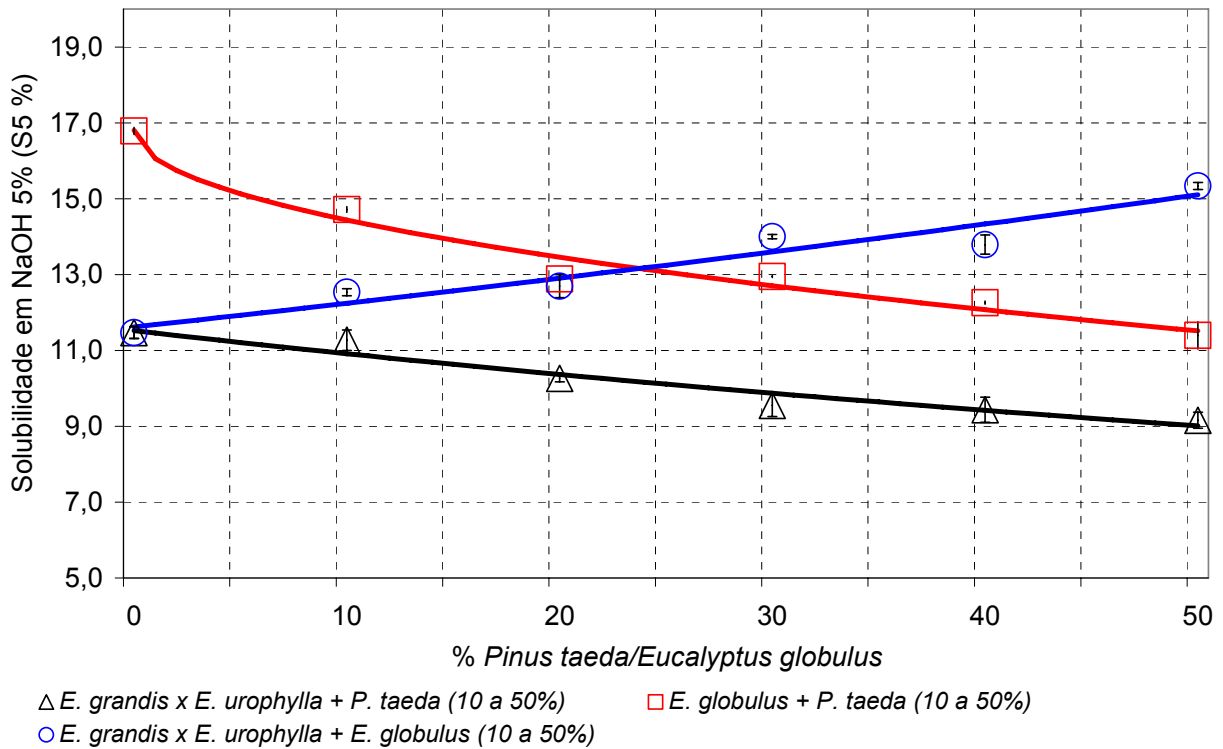


Figura 21 - Solubilidade em NaOH 5% em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

Verificam-se coeficientes de determinação de 0,90, 0,97 e 0,92, respectivamente para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda*, entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda* e entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus*.

Para as misturas entre os *Eucalyptus* e o *Pinus taeda*, verifica-se uma tendência de queda dos valores de S5, enquanto na mistura entre os *Eucalyptus* a tendência verificada é de aumento do S5, à medida que se acrescenta *Eucalyptus globulus* ao *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Para a mistura entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda* encontrou-se valores de S5 entre 9,16 (50% de *Pinus taeda*) a 11,27% (10% de *Pinus taeda*). Para a mistura entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda* os valores variaram entre 11,40 (50% de *Pinus taeda*) a 14,71% (10% de *Pinus taeda*). Desse modo, os valores de S5 para a mistura entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda* foram superiores àqueles encontrados para a mistura ente o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda*, para todas as

proporções testadas. Esse resultado é consequência do elevado teor de S5 do *Eucalyptus globulus*.

Um comportamento contrário, de elevação dos teores de S5, pode ser esperado no caso de adição de *Eucalyptus* ao *Pinus taeda*, pois à medida que a proporção de *Eucalyptus* aumenta na mistura, o S5 aumenta.

### **2.3.4 Características das fibras das polpas celulósicas**

#### **2.3.4.1 Características das fibras das polpas celulósicas das espécies individuais**

Foelkel e Barrichelo (1975a) 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. A qualidade do papel é influenciada pelas características morfológicas das fibras e pela quantidade de fibras por unidade de massa. Uma característica importante das fibras para papéis de impressão com elevado volume específico (“high bulk”) e sanitários (“tissue”) é a espessura de parede celular que, também pode ser correlacionada ao coarseness da polpa. Em geral, polpas produzidas com fibras que apresentam maiores frações parede tendem a produzir polpas com maiores coarseness e papéis com volumes específicos aparentes mais elevados. As fibras mais curtas contribuem para uma boa formação da folha, enquanto as fibras mais longas favorecem a resistência ao rasgo (GOMIDE et al., 2005).

As análises das características de fibras das polpas não branqueadas foram obtidas empregando-se o equipamento Fiber Quality Analyzer (FQA). Na tabela 29 são apresentados os valores obtidos para as características das fibras das polpas celulósicas obtidas através dos cozimentos dos materiais puros.

Tabela 29 - Resultados médios dos parâmetros: comprimento e largura das fibras, teor de finos, coarseness e número de fibras/grama das polpas celulósicas produzidas a partir dos materiais *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*

Tratamento	<i>Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Pinus taeda</i>
Parâmetros			
Comprimento (mm)	0,83 a	0,70 b	1,97 c
Largura (um)	18,15 a	15,53 b	32,00 c
Teor de finos (%)	2,32 a	2,48 a	2,90 b
Coarseness (mg/m)	0,062 a	0,045 b	0,148 c
Número de fibras/g x 10 <sup>6</sup>	23,80 a	38,18 b	6,29 c

As médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade

A análise de variância dos resultados das características das fibras pode ser visualizada no Apêndice K. Os materiais avaliados apresentaram variação significativa quanto às dimensões das fibras, conforme a tabela 29.

As resistências dos papéis à tração, arrebentamento e rasgo são altamente influenciadas pelo comprimento da fibra. A influência do comprimento da fibra na resistência do papel se explica considerando que quanto maiores as fibras, menor é a possibilidade destas se separarem da estrutura do papel quando o mesmo for submetido a um esforço (SANTOS, 2002). Na figura 22 pode-se observar os resultados obtidos para o parâmetro comprimento da fibra.

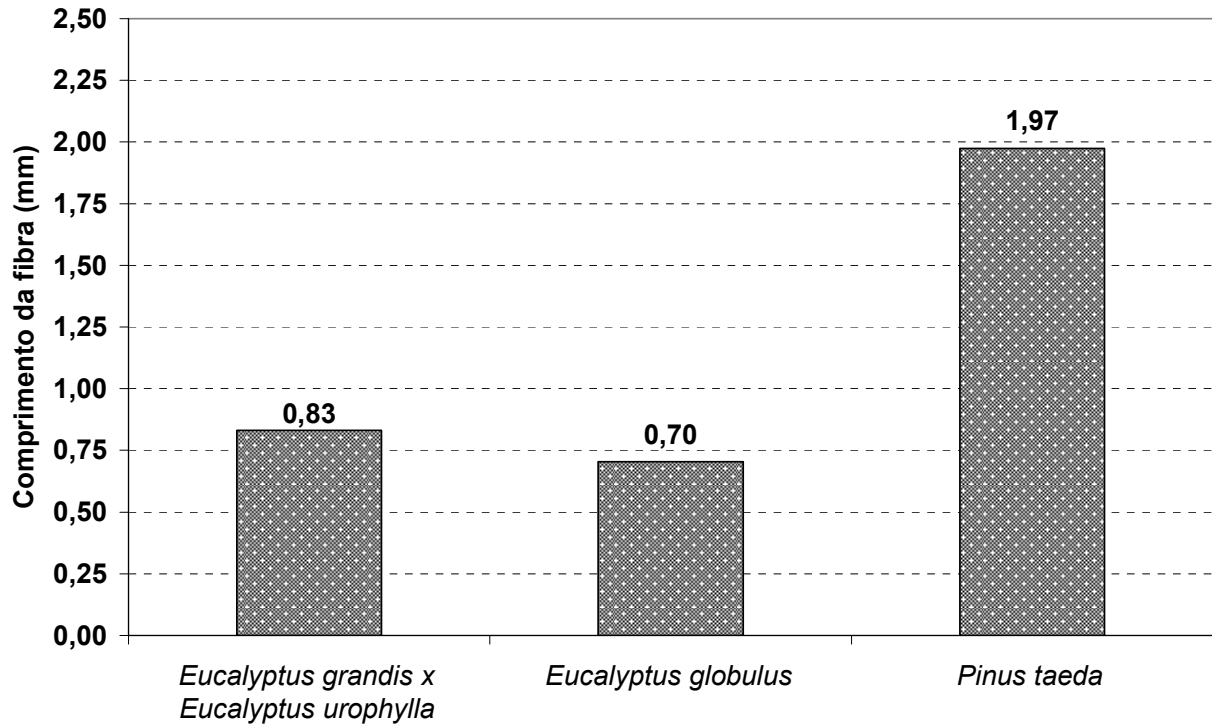


Figura 22 - Comprimento da fibra em polpas celulósicas obtidas a partir do *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*

Para comprimento da fibra foram obtidos valores de 0,83, 0,70 e 1,97mm, respectivamente para os materiais *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*. Nota-se na tabela 29 que os materiais avaliados apresentam diferença estatística entre si quanto ao parâmetro comprimento da fibra.

Na figura 23 pode-se visualizar os resultados obtidos para largura da fibra.



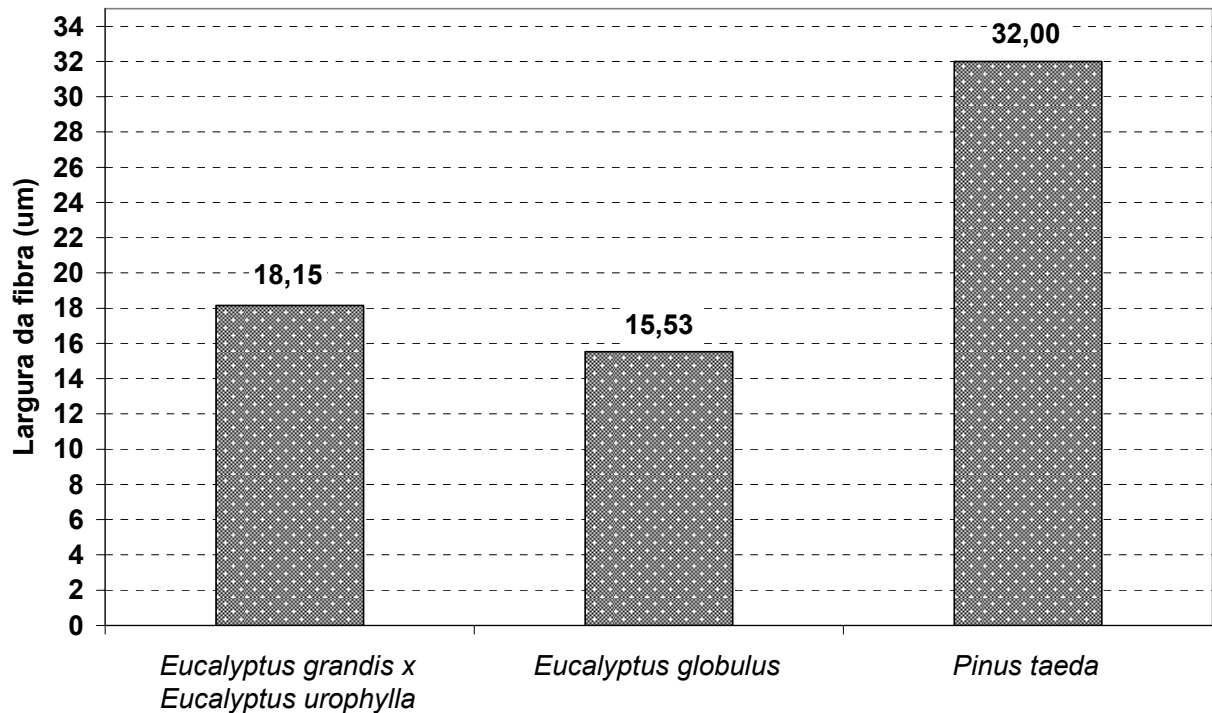


Figura 23 - Largura da fibra em polpas celulósicas obtidas a partir do *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*

Com relação à largura da fibra, os valores de 18,15, 15,53 e 32,00 $\mu\text{m}$ , foram observados para os materiais *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*, respectivamente.

Ao comparar os *Eucalyptus* avaliados, verifica-se que tanto para comprimento como para largura da fibra, o *Eucalyptus globulus* apresenta dimensões inferiores quando comparado ao *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*.

Os resultados para teor de finos são apresentados na figura 24. A importância do teor de finos está associada ao fato deste exercer influência no grau de refino, nas ligações entre fibras, e, a partir de certos limites, contribuir para uma diminuição das resistências à tração e ao estouro.

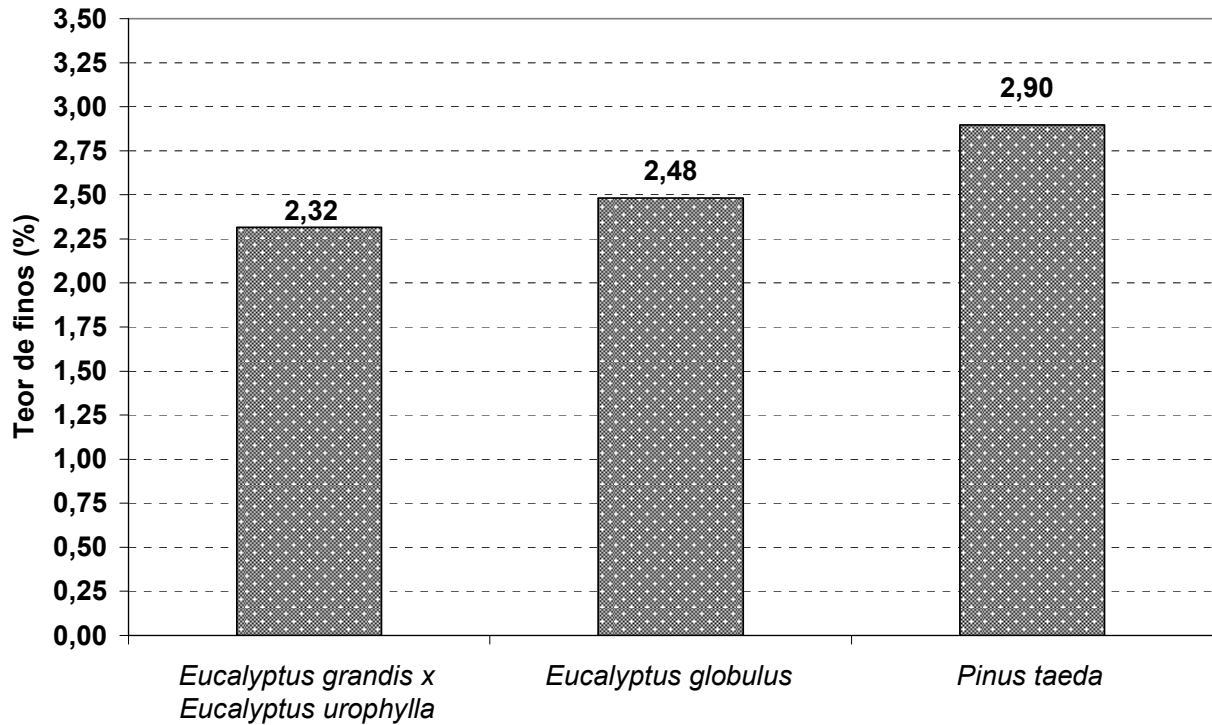


Figura 24 - Teor de finos em polpas celulósicas obtidas a partir do *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*

Para teor de finos, os *Eucalyptus* não apresentam diferença estatística entre si, entretanto o *Pinus taeda* difere dos demais materiais avaliados.

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. Na figura 25 podem ser visualizados os resultados das polpas avaliadas quanto ao coarseness.

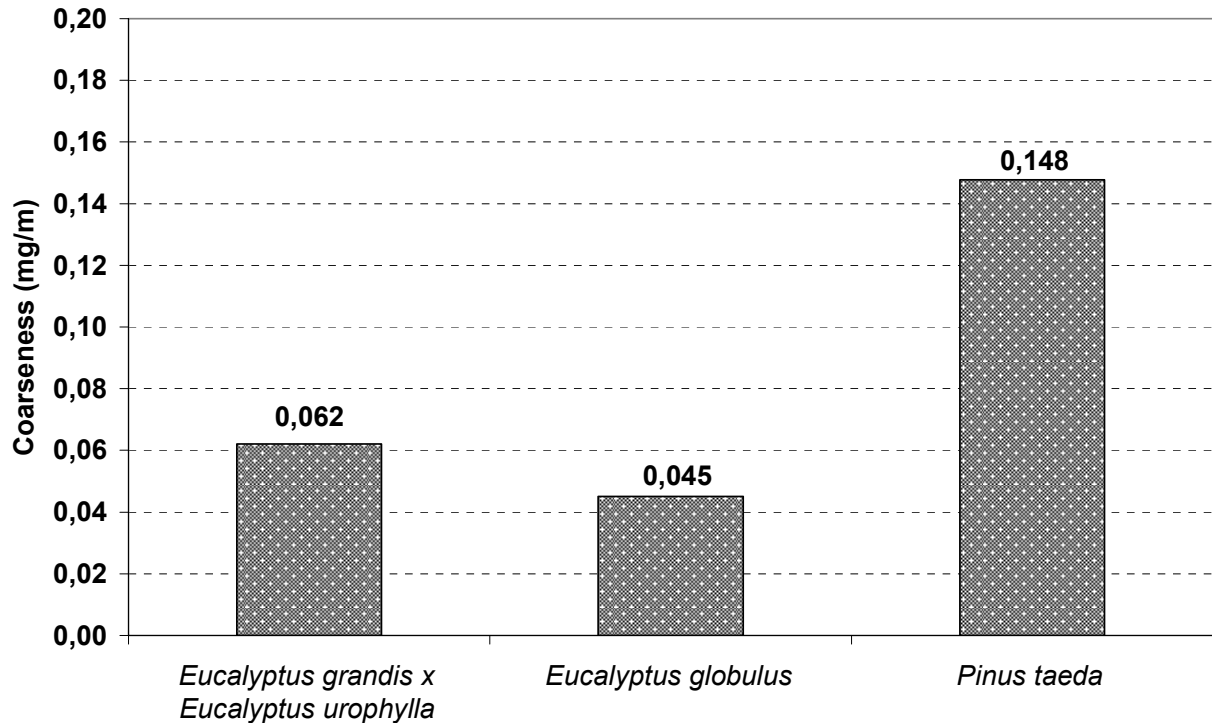


Figura 25 - Coarseness de polpas celulósicas obtidas a partir do *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*

Os valores observados indicam que são necessárias 0,062mg de fibras do *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, para compor 1 metro linear de fibras, enquanto para o *Eucalyptus globulus*, são necessárias 0,045mg, ou seja, as fibras do *Eucalyptus globulus* são “mais leves” do que as do material híbrido, ou menos densas, largas e com maior diâmetro do lume. Esses resultados estão coerentes com os resultados apresentados para comprimento e largura da fibra, onde foi possível verificar que o *Eucalyptus globulus* apresenta fibras de dimensões inferiores ao *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*.

Estas diferenças entre as dimensões de fibras e suas relações para as espécies de *Eucalyptus* consideradas neste trabalho são indicativos de que as polpas celulósicas e papéis obtidos a partir dessas espécies podem apresentar características diferentes levando a obtenção de produtos diferenciados e, a mistura entre estas espécies pode ser uma ferramenta para desenvolvimento de novos produtos.

O número de fibras por unidade de massa é, sem dúvida, 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. Um número de fibras relativamente elevado por unidade de massa implica em um número maior de interfaces fibra-ar, aumentando a capacidade de dispersão de luz e a opacidade do papel. 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 maior número de fibras por grama. Isto comprova que esta característica proporciona mais pontos de contato, aumentando o número de ligações (SANTOS, 2002). Os resultados de número de fibras por grama estão expostos na figura 26.

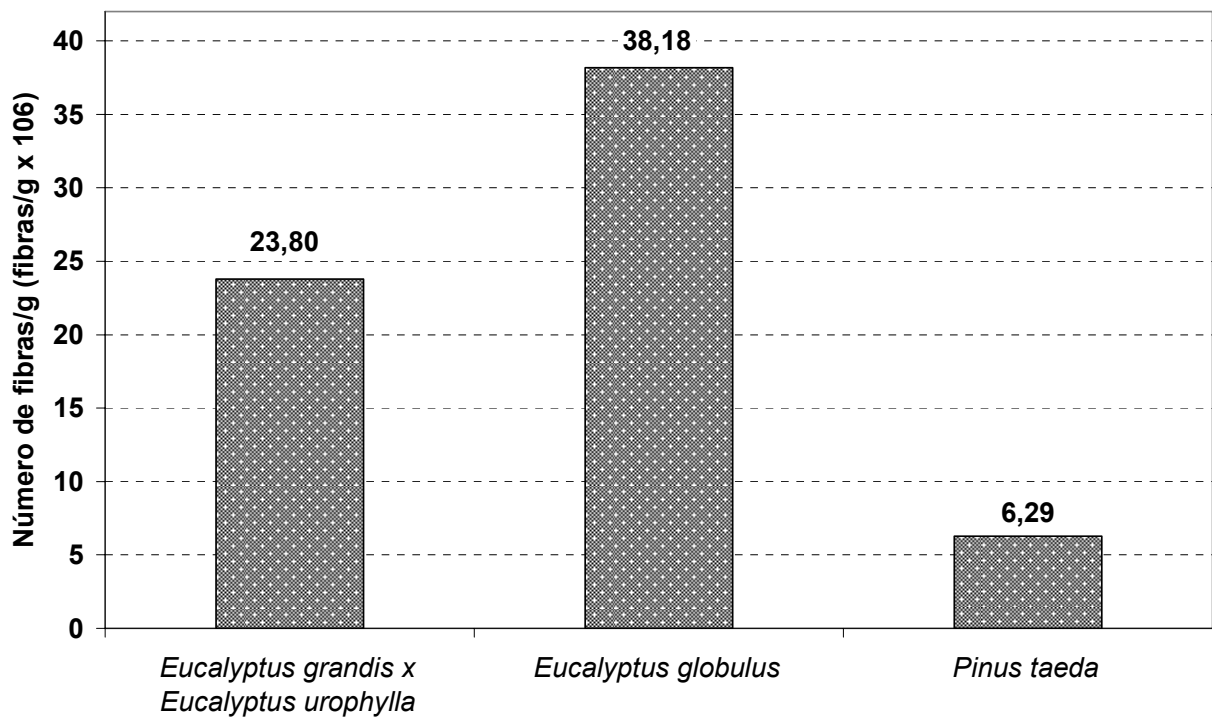


Figura 26 - Número de fibras/grama de polpas obtidas a partir do *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*

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 fibras/g x 10<sup>6</sup>, devido às maiores dimensões das

fibras dessa espécie. A polpa produzida com o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* apresentou um valor intermediário entre as polpas avaliadas, 23,8 fibras/g x  $10^6$ , enquanto a polpa de *Eucalyptus globulus* apresentou um valor extremamente elevado, de 38,18 x  $10^6$  fibras/g.

Gomide et al. (2005) avaliando clones comerciais de *Eucalyptus*, pertencentes a empresas produtoras de celulose no Brasil, obtiveram uma média de 0,99mm para comprimento de fibras, com pequena variabilidade, de apenas 0,95 a 1,07mm. Os autores citam que essa pequena variabilidade é comumente observada entre clones de eucalipto e, também, pode ser atribuída às pequenas variações inerentes à técnica de medição utilizada que consistiu no uso de microscópio ótico-digital computadorizado e na medição de apenas fibras inteiras, desconsiderando-se pedaços de fibras. Para largura da fibra, o resultado médio reportado foi de 18,2 $\mu$ m, com valores variando entre 17,3 a 19,2 $\mu$ m. Os autores avaliaram ainda o coarseness das polpas e o número de fibras por grama. Os valores variaram entre 5,1 e 8,3mg/100m para coarseness e entre 16,3 a 27,7 milhões para número de fibras por grama.

Vale ressaltar que para as medições das dimensões das fibras, nesse trabalho, utilizou-se o equipamento FQA, que mede, não só as fibras inteiras, como também as cortadas, e, devido a isso, os valores obtidos podem ser inferiores aos reportados por Gomide et al. (2005).

Kibblewhite, Johnson e Shelbourne (2000) avaliaram polpas produzidas a partir de *Eucalyptus globulus* e os valores observados para comprimento da fibra foram 0,85mm.

Mokfienski et al. (2003) avaliou dez madeiras de *Eucalyptus* sp. e suas associações no rendimento do processo de polpação kraft e na qualidade da polpa branqueada. Foram observados resultados entre 0,75 e 0,98mm para comprimento da fibra, 25,1 e 38,0 x  $10^6$  para número de fibras por grama, coarseness entre 4,58 a 6,67mg/100m e teor de finos entre 6,34 a 8,56%.

Foelkel e Barrichelo (1975b) avaliaram a mistura de polpas celulósicas de *Eucalyptus saligna* com número kappa de 15 e *Pinus caribaea* com número kappa de 30, e citam que respectivamente, as polpas individuais apresentavam as seguintes

características: 0,97 e 2,93mm para comprimento da fibra e 14,8 e 43,1µm para largura da fibra.

As dimensões de fibras obtidas neste trabalho para os *Eucalyptus* podem ser consideradas típicas para as espécies em questão. O *Pinus taeda*, no entanto, apresentou valores de dimensões de fibras inferiores aos citados em literatura, o que pode ser justificado, em parte, pela utilização de um material com apenas 9 anos de idade.

#### **2.3.4.2 Características das fibras das polpas celulósicas das misturas entre *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Pinus taeda* e *Eucalyptus globulus***

Nas tabelas 30, 31 e 32 são apresentados os valores obtidos para as características das fibras das polpas celulósicas obtidas através dos cozimentos de misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus globulus*, nas proporções de 10 a 50% de *Eucalyptus globulus*.

Tabela 30 - Resultados médios dos parâmetros: comprimento e largura das fibras, teor de finos, coarseness e número de fibras/grama das polpas celulósicas produzidas a partir das misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Pinus taeda</i>					
% <i>Pinus taeda</i>	Comprimento da fibra (mm)	Largura da fibra ( $\mu\text{m}$ )	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

Tabela 31 - Resultados médios dos parâmetros: comprimento e largura das fibras, teor de finos, coarseness e número de fibras/grama das polpas celulósicas produzidas a partir das misturas entre os materiais *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus globulus</i> + <i>Pinus taeda</i>					
% <i>Pinus taeda</i>	Comprimento da fibra (mm)	Largura da fibra ( $\mu\text{m}$ )	Teor de finos (%)	Coarseness (mg/m)	Número de fibras/g x $10^6$
0	0,704	15,53	2,48	0,045	38,18
10	0,747	15,70	2,47	0,047	35,93
20	0,789	15,83	2,57	0,050	33,33
30	0,845	16,13	2,55	0,056	29,29
40	0,881	16,55	2,65	0,060	26,94
50	0,991	17,23	2,64	0,067	23,13
100	1,975	32,00	2,90	0,148	6,29

Tabela 32 - Resultados médios dos parâmetros: comprimento e largura das fibras, teor de finos, coarseness e número de fibras/grama das polpas celulósicas produzidas a partir das misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus globulus*, nas proporções de 10 a 50% de *Eucalyptus globulus*

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Eucalyptus globulus</i>					
% <i>Eucalyptus globulus</i>	Comprimento da fibra (mm)	Largura da fibra ( $\mu\text{m}$ )	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	0,822	17,73	2,03	0,057	25,68
20	0,802	17,15	2,19	0,057	26,63
30	0,795	17,55	2,09	0,056	27,05
40	0,786	17,00	2,12	0,052	29,59
50	0,768	16,63	2,52	0,055	29,48
100	0,704	15,53	2,48	0,045	38,18

As tabelas 33, 34 e 35 apresentam um resumo da análise estatística para características das fibras das polpas celulósicas das misturas avaliadas nesse trabalho. Nela pode-se visualizar o resultado das análises de variância (significativo ou não), o modelo ajustado, com seus parâmetros a e b e os resultados de correlação obtidos. As análises de variância dos dados apresentados nas tabelas 30, 31 e 32 podem ser visualizadas nos apêndices L, M e N.



Tabela 33 - Resultados da análise estatística para características das fibras das polpas celulósicas das misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Pinus taeda</i>					
Parâmetro	Anova	Modelo ajustado	a	b	R <sup>2</sup> (%)
Comprimento (mm)	Significativo	$Y = 1 / (a + bx)$	1,21399	-0,00647523	98,37
Largura (µm)	Significativo	$Y = a + bx$	17,475	0,0235	42,49
Teor de finos (%)	Não significativo	-	-	-	-
Coarseness (mg/m)	Significativo	$Y = 1 / (a + bx)$	16,5745	-0,0823864	88,97
Número de fibras/grama x 10 <sup>6</sup>	Significativo	$Y = a + bx$	24,5357	-0,157429	93,10

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

Tabela 34 - Resultados da análise estatística para características das fibras das polpas celulósicas das misturas entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus globulus</i> + <i>Pinus taeda</i>					
Parâmetro	Anova	Modelo ajustado	a	b	R <sup>2</sup> (%)
Comprimento (mm)	Significativo	$Y = 1 / (a + bx)$	1,42281	-0,0078699	98,38
Largura (µm)	Significativo	$Y = 1 / (a + bx)$	0,065025	-0,0001221	87,03
Teor de finos (%)	Significativo	$Y = 1 / (a + bx)$	0,407182	-0,0006132	26,99
Coarseness (mg/m)	Significativo	$Y = 1 / (a + bx)$	22,6215	-0,149065	93,82
Número de fibras/grama x 10 <sup>6</sup>	Significativo	$Y = a + bx$	38,7095	-0,303214	95,11

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

Tabela 35 - Resultados da análise estatística para características das fibras das polpas celulósicas das misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus*

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Eucalyptus globulus</i>					
Parâmetro	Anova	Modelo ajustado	a	b	R <sup>2</sup> (%)
Comprimento (mm)	Significativo	$Y = a + bx$	0,831714	-0,0012435	90,30
Largura (µm)	Significativo	$Y = 1/(a + bx)$	0,0554057	0,0000890	81,03
Teor de finos (%)	Não significativo	-	-	-	-
Coarseness (mg/m)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	0,0617868	-0,0011966	75,37
Número de fibras/grama x 10 <sup>6</sup>	Significativo	$Y = (a + bx)^2$	4,91635	0,0111983	82,76

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

Para permitir uma melhor visualização e interpretação dos dados apresentados nas tabelas 30, 31 e 32 os resultados das misturas foram plotados juntos. O eixo das ordenadas representa a porcentagem de *Pinus taeda* nas misturas com o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e com o *Eucalyptus globulus*, e também a porcentagem do *Eucalyptus globulus* nas misturas com o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

Na figura 27 pode-se observar os resultados obtidos para comprimento da fibra nas misturas avaliadas.

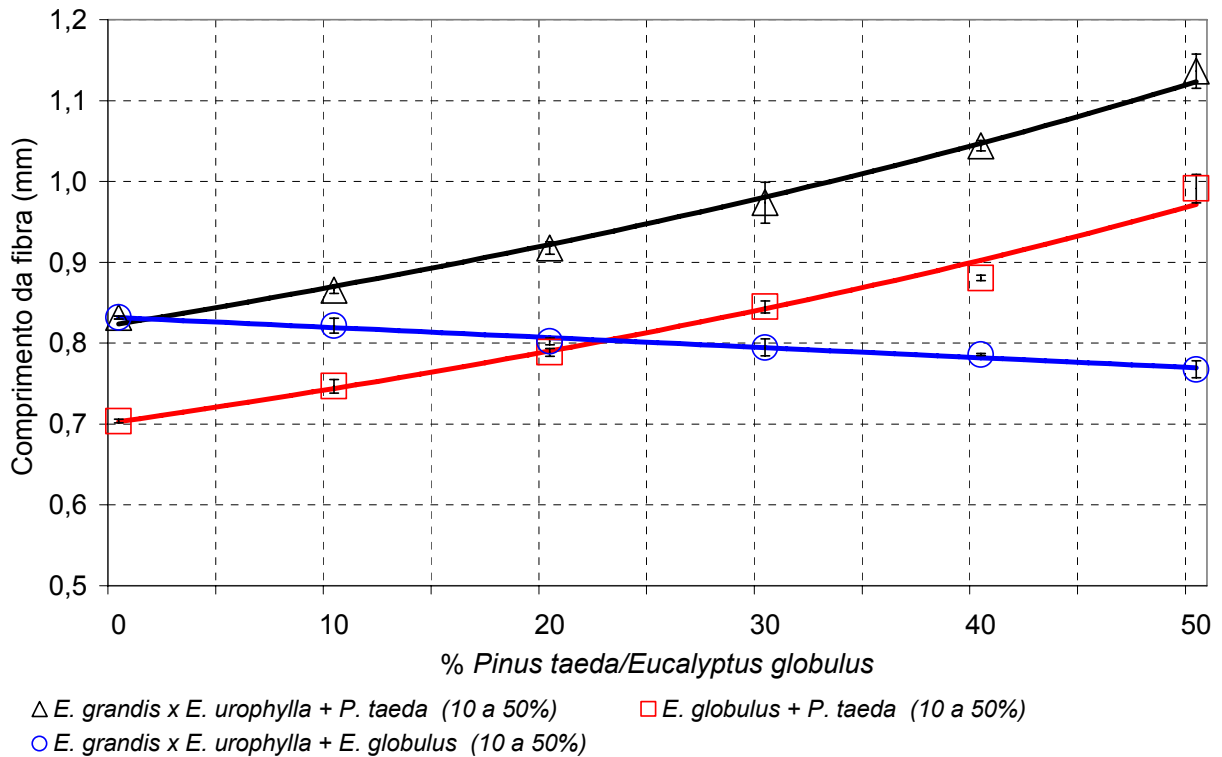


Figura 27 - Comprimento da fibra em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

Para as misturas entre os *Eucalyptus* e o *Pinus taeda*, os valores de comprimento da fibra aumentam à medida que se acrescenta o *Pinus* na mistura. Verifica-se, porém que os valores de comprimento da fibra são sempre mais elevados nas misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda*. Esse fato é resultado dos comprimentos individualizados das fibras. Em outras palavras, o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* apresenta comprimento médio das fibras igual a 0,83mm, enquanto o *Eucalyptus globulus* apresenta valores médios de 0,70mm. Isso faz com que a mistura do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com o *Pinus taeda* tenha sempre um comprimento médio de fibras maior do que a mistura entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda*, para uma mesma proporção de *Pinus taeda* na mistura.

Na mistura entre os *Eucalyptus*, é observada uma tendência de queda dos valores médios de comprimento da fibra à medida que se adiciona *Eucalyptus globulus* ao *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. A explicação para esse fato é a mesma

do parágrafo anterior, ou seja, devido ao menor tamanho das fibras da polpa celulósica de *Eucalyptus globulus*.

Com relação ao comprimento da fibra, observam-se coeficientes de determinação de 0,98 para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* e para misturas entre o *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* e de 0,90 para misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus*. Estas observações mostram que a adição de *Pinus taeda* altera a distribuição do comprimento de fibras das polpas celulósicas avaliadas, podendo levar a alterações de suas características físico-mecânicas e conseqüentemente o desenvolvimento de produtos com características diferenciadas e específicas.

Bugajer e Kuan (1980) avaliando o comportamento de misturas de polpas celulósicas de eucalipto e pinho na fabricação de papel citam que a distribuição do comprimento de fibras nas misturas é proporcional ao comprimento de fibras das polpas celulósicas originais. Os resultados observados no presente trabalho estão de acordo com a citação Bugajer e Kuan (1980), apesar de tratar de misturas de madeira, previamente ao cozimento, e não de misturas de polpas celulósicas.

A figura 28 apresenta os resultados obtidos para largura das fibras.

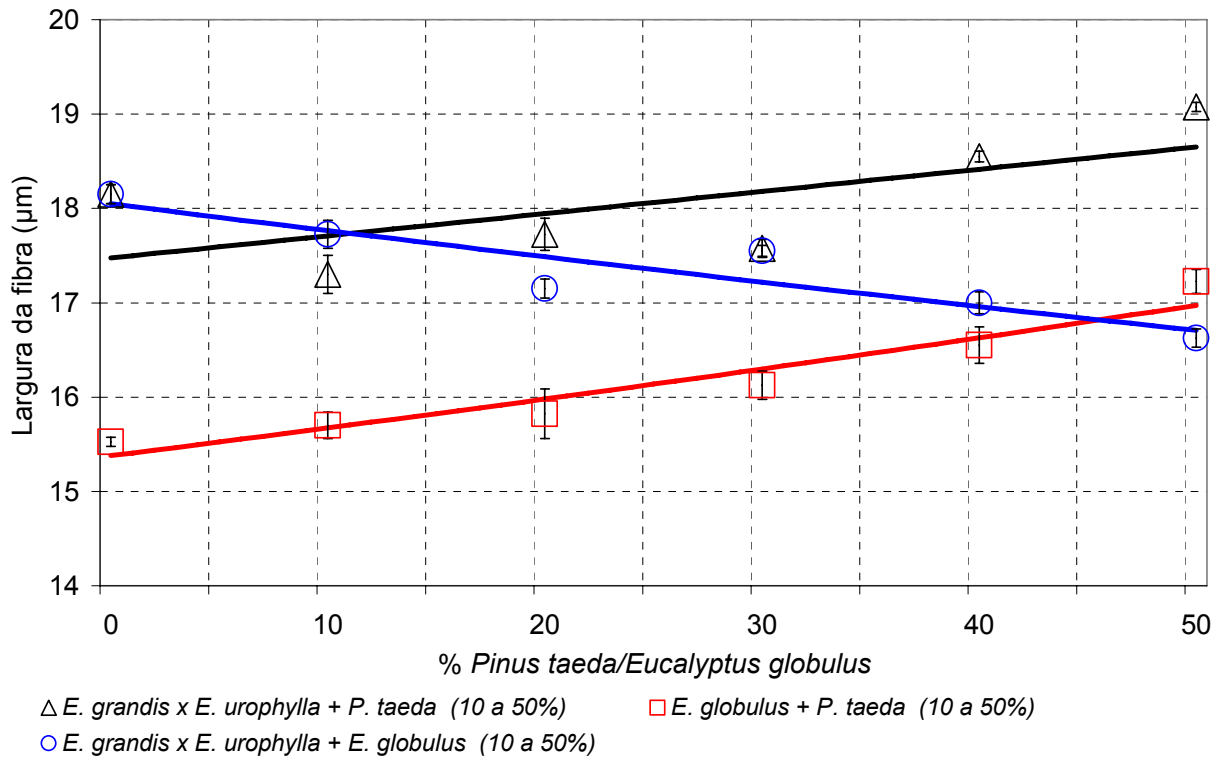


Figura 28 - Largura da fibra em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

Para largura da fibra, nas misturas entre os *Eucalyptus* e o *Pinus taeda*, os valores apresentam uma tendência de aumento, à medida que se acrescenta o *Pinus taeda* na mistura. Uma superioridade é verificada para a mistura do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com o *Pinus taeda*, para todas as proporções avaliadas. Esse fato é explicado pela largura das fibras das polpas produzidas individualmente, cujos resultados médios foram de 18,15µm para o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e de 15,53µm para o *Eucalyptus globulus*.

Nas misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus* nota-se uma tendência de queda da largura da fibra à medida que aumenta a proporção de *Eucalyptus globulus* na mistura. Isso ocorre devido à diferença na largura das fibras observada entre esses materiais, nas polpas produzidas individualmente.

São observados coeficientes de determinação para os modelos ajustados das misturas estudadas, de 0,87 e 0,81 respectivamente para as misturas entre o *Eucalyptus globulus* com o *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com *Eucalyptus globulus*.

A largura das fibras de uma polpa celulósica, quando analisada isoladamente, é de pouca significância na avaliação das características da polpa celulósica; com a largura pode-se estimar o perímetro da fibra e assim a área possível de contato quando a mesma for colapsada durante o processo de produção de papel. No entanto, para uma estimativa mais precisa da área de contato das fibras quando submetidas à produção de papel, é importante também o conhecimento da espessura da parede, pois, a associação destas duas dimensões, largura da fibra e espessura da parede, permite a determinação de um grande número de variáveis que proporcionam informações importantes a cerca das características físico-mecânicas da polpa obtida.

Observa-se de maneira geral uma tendência de estabilidade para o parâmetro teor de finos, com o incremento da proporção de *Pinus taeda* e *Eucalyptus globulus* às misturas, conforme as tabelas 30, 31 e 32. Os valores obtidos nas misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda* variaram entre 2,16 a 2,39%, enquanto para a mistura entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda*, estes situaram-se entre 2,47 e 2,64% e na mistura entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus* a variação observada foi entre 2,03 a 2,52%.

Foram verificadas variações para os valores de coarseness obtidos nas misturas testadas, conforme a figura 29.

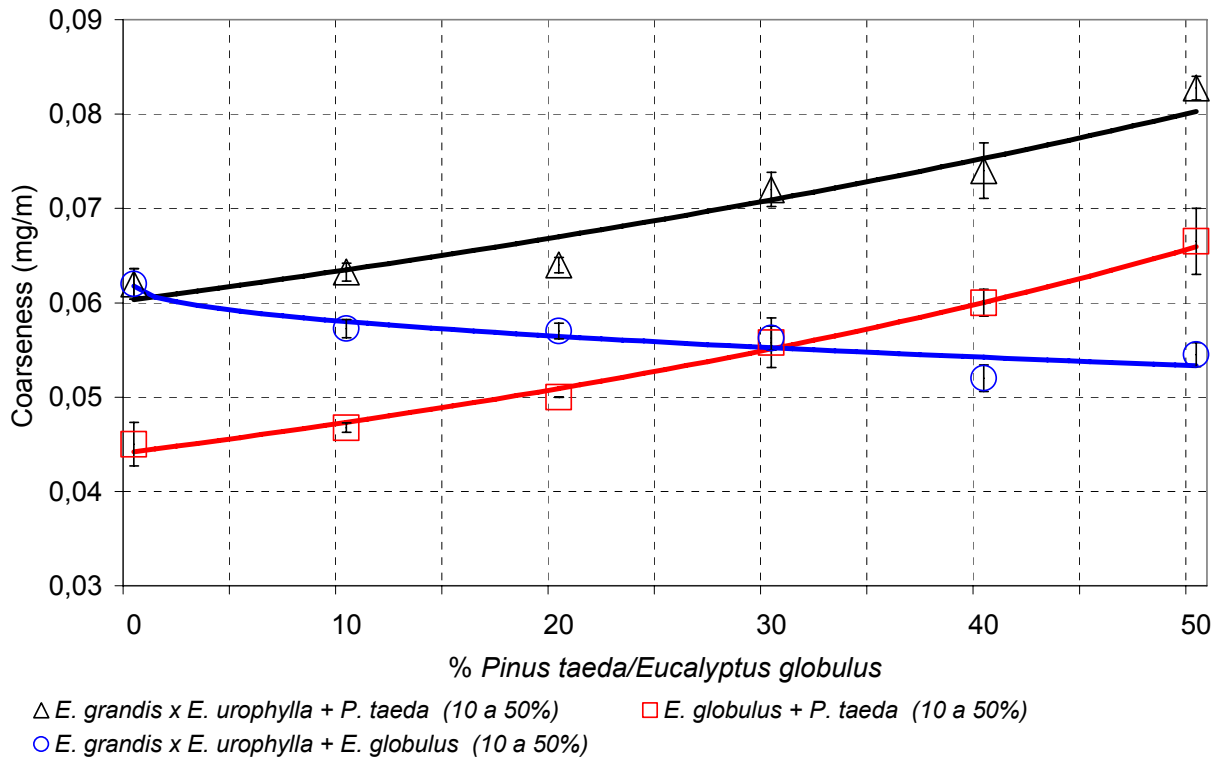


Figura 29 - Coarseness em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

O coarseness representa o peso (em mg) de 1m de fibras dispostas de forma alinhadas. A figura 29 mostra que á 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*. Segundo Abitz e Luner (1991 apud SANTOS 2002), o coarseness é fortemente influenciado pela espessura da parede da fibra e aumenta à medida que o comprimento da fibra aumenta.

Ao comparar as misturas dos *Eucalyptus* com *Pinus taeda*, observa-se que os valores de coarseness são sempre mais elevados nas misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda*. Justifica-se esse fato levando em conta os valores obtidos nas polpas individualizadas, nos quais os valores obtidos para coarseness foram 0,062 e 0,045mg/m para o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus globulus*, respectivamente.

Para a mistura entre os *Eucalyptus*, à medida que se acrescenta *Eucalyptus globulus* ao *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* o coarseness tende a diminuir, pelo mesmo motivo exposto no parágrafo anterior.

Para os modelos ajustados de coarseness em função da proporção de misturas de cavacos, foram observados coeficiente de determinação de 0,89 e 0,94 para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* e entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda*, respectivamente.

A figura 30 apresenta o comportamento das misturas com relação ao número de fibras por grama.

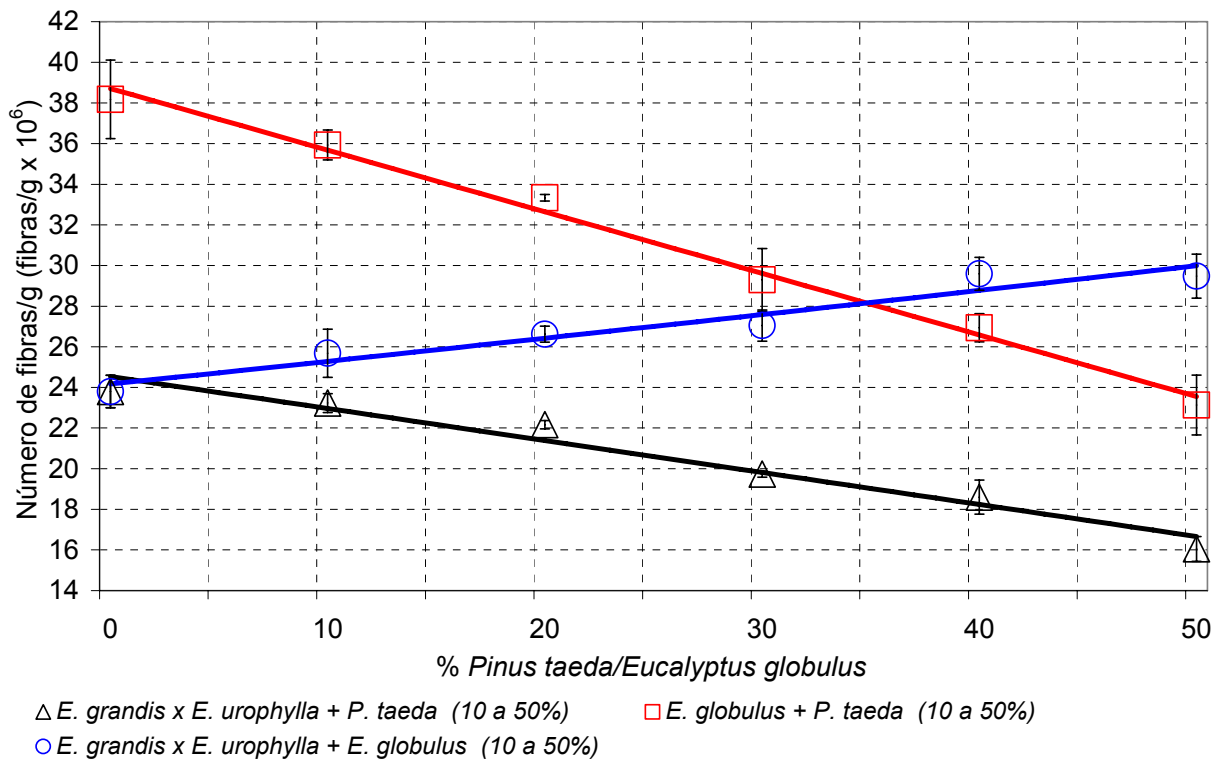


Figura 30 - Número de fibras/grama em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

Nota-se que à medida que se acrescenta *Pinus* aos *Eucalyptus* o número de fibras por grama apresenta uma tendência de queda. A mistura de *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* possui um maior número de fibras por grama que a mistura entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda*, independentemente da proporção da mistura. Como justificativa, ressalta-se a diferença no parâmetro em



questão verificado nos materiais puros, onde foram obtidos resultados de 38,18 e 23,80 x 10<sup>6</sup> fibras por grama para os materiais *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, respectivamente. Na mistura entre os *Eucalyptus*, observa-se que à medida que se acrescenta *Eucalyptus globulus* ao *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, o número de fibras por grama demonstra uma tendência de aumento.

Para os modelos ajustados entre a proporção de número de fibras por grama e a porcentagem de adição de *Pinus taeda* e *Eucalyptus globulus*, foram observados coeficientes de determinação de 0,93, 0,95 e 0,83 para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda*, o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda* e entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus*, respectivamente.

A partir dos resultados obtidos nas misturas avaliadas, pode-se afirmar que os tratamentos com maior proporção de *Pinus taeda*, quando comparados com aqueles que apresentam menor proporção, vão dar origem a polpas celulósicas com maior comprimento e largura de fibras, maior coarseness e menor número de fibras por grama. Consequentemente, as polpas celulósicas devem apresentar menor opacidade, densidade aparente, grau de ligações interfibras e consequentemente menor resistência à tração e ao estouro. Com relação à resistência ao rasgo, espera-se uma elevação, devido ao aumento do comprimento médio das fibras, com o aumento da proporção de *Pinus taeda* nas misturas.

As polpas celulósicas formadas pelas misturas entre os *Eucalyptus*, por sua vez, apresentarão menor comprimento e largura de fibras, menor coarseness e maior número de fibras por grama, à medida que a proporção de *Eucalyptus globulus* aumenta na mistura. Essas características vão contribuir para uma maior opacidade e maior capacidade de ligação interfibras, aumentando as resistências à tração e ao estouro e proporcionarão uma boa formação da folha e uma densidade aparente maior.

Deve-se destacar que as variações nas características das fibras das polpas celulósicas obtidas a partir de misturas é um forte indicativo da possibilidade de se desenvolver produtos com características específicas, representando uma efetiva diferenciação do produto polpa celulósica.

## 2.3.5 Testes físico-mecânicos e drenabilidade

### 2.3.5.1 Testes físico-mecânicos e drenabilidade das polpas celulósicas das espécies individuais

De acordo com Salvador et al. (2000) os principais tipos de madeira comercialmente empregados podem ser classificados entre coníferas e folhosas. As coníferas se caracterizam por possuírem fibras longas e as folhosas fibras curtas. Conseqüentemente produzem celulosas com características diferentes. A celulose proveniente de coníferas mostra uma maior resistência ao rasgo e aquela proveniente de folhosas uma satisfatória resistência à tração e ao arrebatamento.

Segundo Hortal (1988) as propriedades e qualidade das polpas e papéis estão estreitamente relacionadas com as características morfológicas das fibras e suas resistências.

A tabela 36 apresenta os resultados dos testes físico-mecânicos e drenabilidade obtidos nas polpas celulósicas não refinadas (polpa marrom), produzidas nos cozimentos dos materiais puros.

Tabela 36 - Resultados médios de drenabilidade e dos testes físico-mecânicos efetuados nas polpas celulósicas não refinadas, produzidas a partir dos materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*

Parâmetros \ Tratamento	<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Pinus taeda</i>
Drenabilidade (°SR)	23,8 a	29,0 b	14,8 c
Índice de rasgo (mN.m <sup>2</sup> /g)	7,0 a	7,1 a	13,9 b
Índice de tração (N.m/g)	64,4 ab	72,1 a	53,1 b
Alongamento (%)	1,5 b	2,3 a	2,7 a
Índice de estouro (kPa.m <sup>2</sup> /g)	2,8 b	3,8 a	3,6 ab

As médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade

A análise de variância dos resultados das análises de testes físicos pode ser visualizada no Apêndice O. Verifica-se diferença estatística entre os materiais estudados, para todos os parâmetros avaliados, conforme a tabela 36.

A drenabilidade esta relacionada à capacidade de absorção de água pelas fibras. Esta é elevada com o refino, até certos níveis que não prejudiquem o andamento das máquinas de papel, pois, a maior facilidade de drenagem das fibras influencia positivamente a velocidade da máquina de papel devido ao maior teor seco no final da tela, beneficiando a resistência a úmido. Na figura 31 pode-se observar os resultados obtidos para o parâmetro drenabilidade.

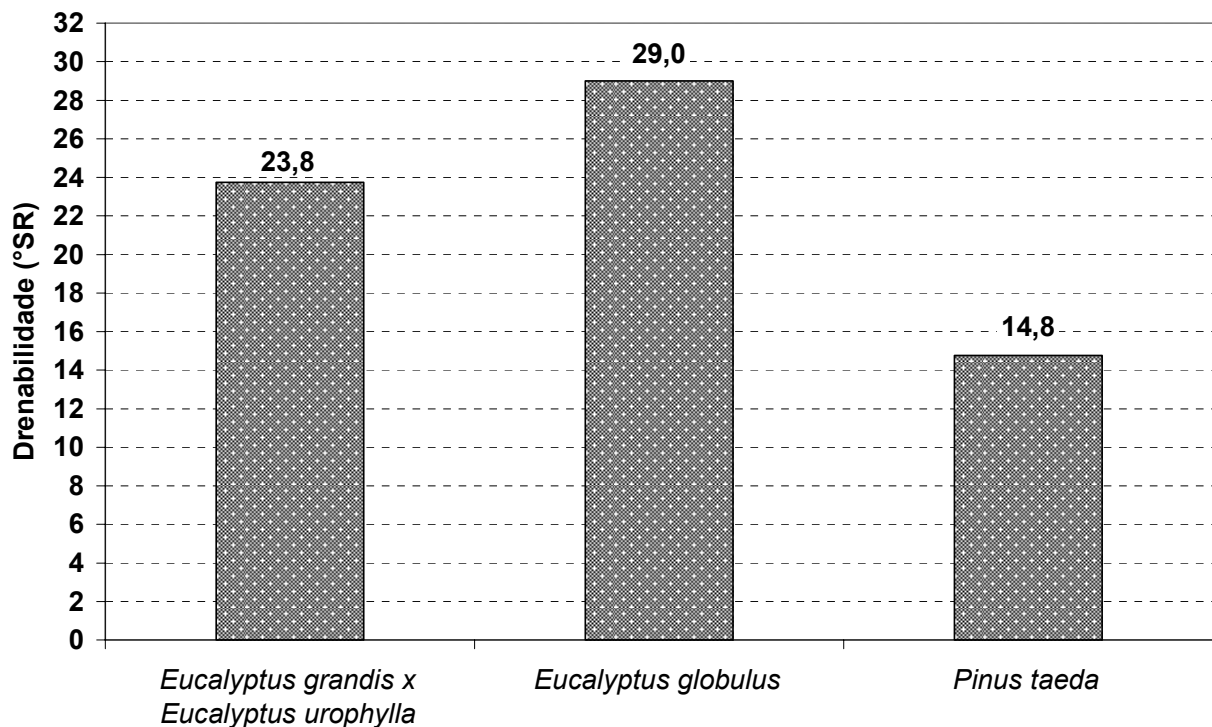


Figura 31 - Drenabilidade de polpas celulósicas obtidas a partir do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*

O *Eucalyptus globulus* apresenta um elevado teor de hemiceluloses (16,79%) presentes na polpa expressos pela solubilidade em NaOH 5% (S5). As hemiceluloses são hidrofílicas, amorfas e promovem a capacidade de absorção de água pelas fibras. Este fato pode ser parcialmente responsável pelo maior valor de drenabilidade (°SR) observado para essa polpa celulósica. Outro fator a considerar é o maior número de

fibras por grama observado na polpa celulósica do *Eucalyptus globulus*, pois 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 fibras/g x 10<sup>6</sup>, fatores que podem contribuir para o valor de drenabilidade observado na figura 31, de 23,75 °SR, devido aos fatores citados anteriormente. Esta diferença em drenabilidade entre as amostras de eucalipto é um indicativo de que pode haver necessidade de otimizações em máquinas de secagem de polpa celulósica, visando garantir os mesmos níveis de produção e de teor de umidade na polpa celulósica final, em casos de alteração na matéria-prima.

O *Pinus taeda*, por sua vez apresenta, entre os materiais avaliados o menor teor de S5 (7,95%) e o menor valor observado para número de fibras por grama (6,29 fibras/g x 10<sup>6</sup>). Conseqüentemente, este material apresenta uma drenabilidade inferior quando comparado ao *Eucalyptus globulus* e ao *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

A resistência ao rasgo, por definição, é o trabalho executado por um pêndulo, necessário para rasgar um conjunto de folhas, após um corte inicial de comprimento especificado ter sido previamente realizado nas amostras. O índice de rasgo é o resultado da divisão da força média necessária para rasgar uma folha, pela gramatura da mesma. A figura 32 apresenta o índice de rasgo das polpas avaliadas neste trabalho.

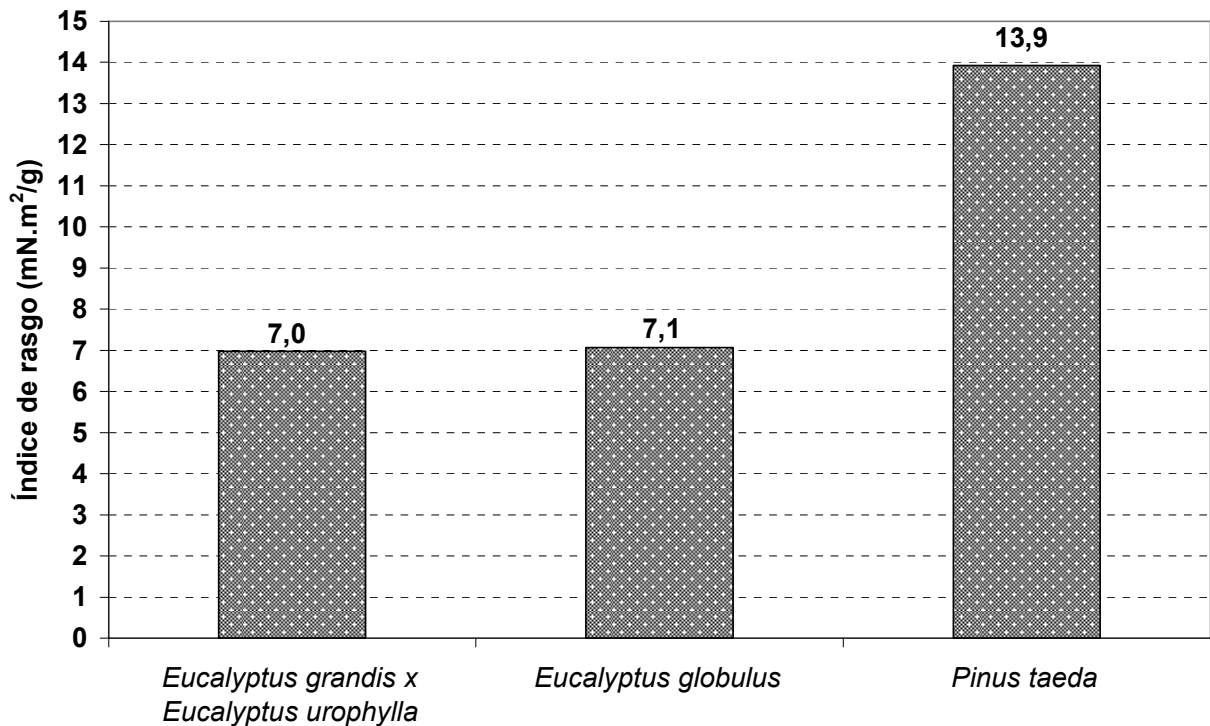


Figura 32 - Índice de rasgo em polpas celulósicas obtidas a partir do *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*

A polpa celulósica do *Pinus taeda* destaca-se das demais polpas avaliadas, com um índice de rasgo de 13,9mN.m<sup>2</sup>/g. Os valores obtidos para as polpas celulósicas dos *Eucalyptus* são aproximadamente metade do valor observado para a polpa do *Pinus taeda*, respectivamente 7,0 e 7,1mN.m<sup>2</sup>/g para as polpas originadas do *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla* e do *Eucalyptus globulus*. 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.

A resistência ao rasgo é uma importante propriedade de polpas celulósicas destinadas à produção de papel, pois está inversamente relacionada ao número de quebras de folhas de máquinas de papel e conseqüentemente à eficiência desta. A quebra da folha em máquina de papel se dá fundamentalmente pela propagação do rasgo em uma proporção de 1/100 em relação à tração; por este motivo, em muitas máquinas de papel em operação no mundo pratica-se a adição de fibra longa à fibras

curtas, visando aumentar a velocidade da máquina, a redução do número de quebras, a produção de papéis de baixa gramatura e o aumento de produção. O aumento da resistência ao rasgo em uma polpa celulósica torna possível o aumento da velocidade de trabalho de uma máquina de papel e conseqüentemente, um aumento de produção.

A resistência da fibra à tração, na sua direção longitudinal, contribui significativamente para as propriedades da polpa celulósica e do papel. A resistência da polpa celulósica e do papel depende da relação entre resistência à tração das fibras individuais e a resistência ao cisalhamento das ligações interfibras. Uma quebra numa folha de papel pode ser considerada como uma reação em cadeia, iniciada pela quebra da fibra ou de uma 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 (FOELKEL; BARRICHELO, 1975d). A figura 33 apresenta os valores obtidos para índice de tração nas polpas celulósicas avaliadas.

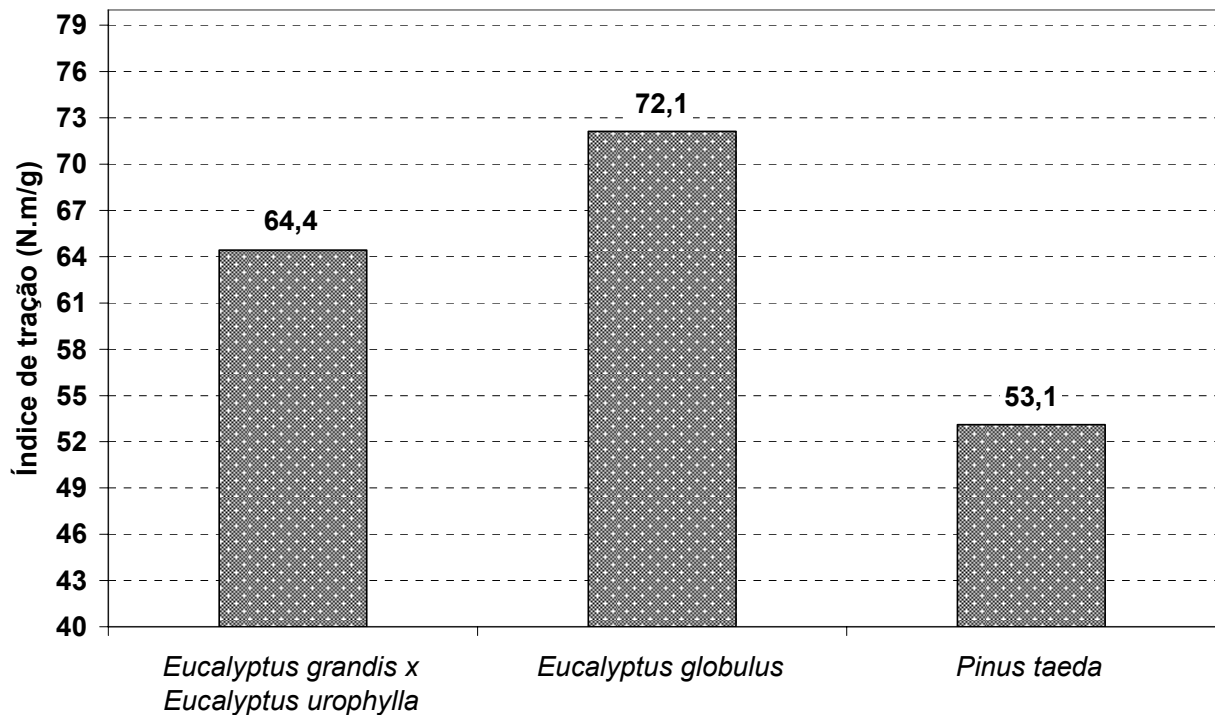


Figura 33 - Índice de tração em polpas celulósicas obtidas a partir do *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*

Entre os materiais avaliados, as polpas celulósicas produzidas com os *Eucalyptus* apresentam maiores valores para o índice de tração, e entre elas, a polpa celulósica do *Eucalyptus globulus* apresenta o maior valor, de 72,1N.m/g, seguido do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, com um índice de tração de 64,4N.m/g. O menor índice de tração foi observado na polpa celulósica do *Pinus taeda*, com 53,1N.m/g.

Os resultados de alongamento podem ser visualizados na figura 34.

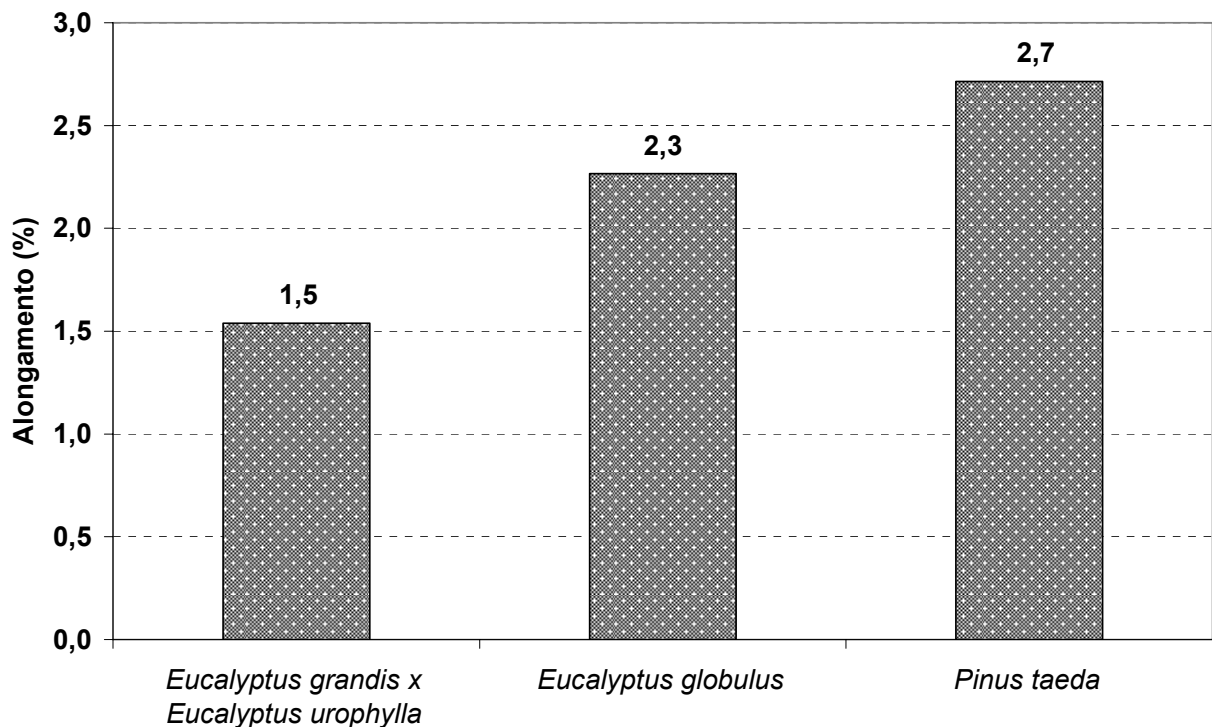


Figura 34 - Alongamento em polpas celulósicas obtidas a partir do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*

Para o parâmetro alongamento, a polpa celulósica do *Pinus taeda* apresentou um valor de 2,7%, enquanto as polpas celulósicas dos *Eucalyptus* apresentaram valores de 1,5 e 2,3%, respectivamente para o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus globulus*.

O maior alongamento observado na polpa 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 polpa celulósica do *Eucalyptus*

*globulus* apresenta um valor elevado para alongamento, quando comparado ao *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, que pode ser explicado pelo maior número de fibras por grama observado e o conseqüente maior número de ligações interfibras, que aumentam as resistências da polpa celulósica.

Os resultados de índice de estouro são apresentados na figura 35.

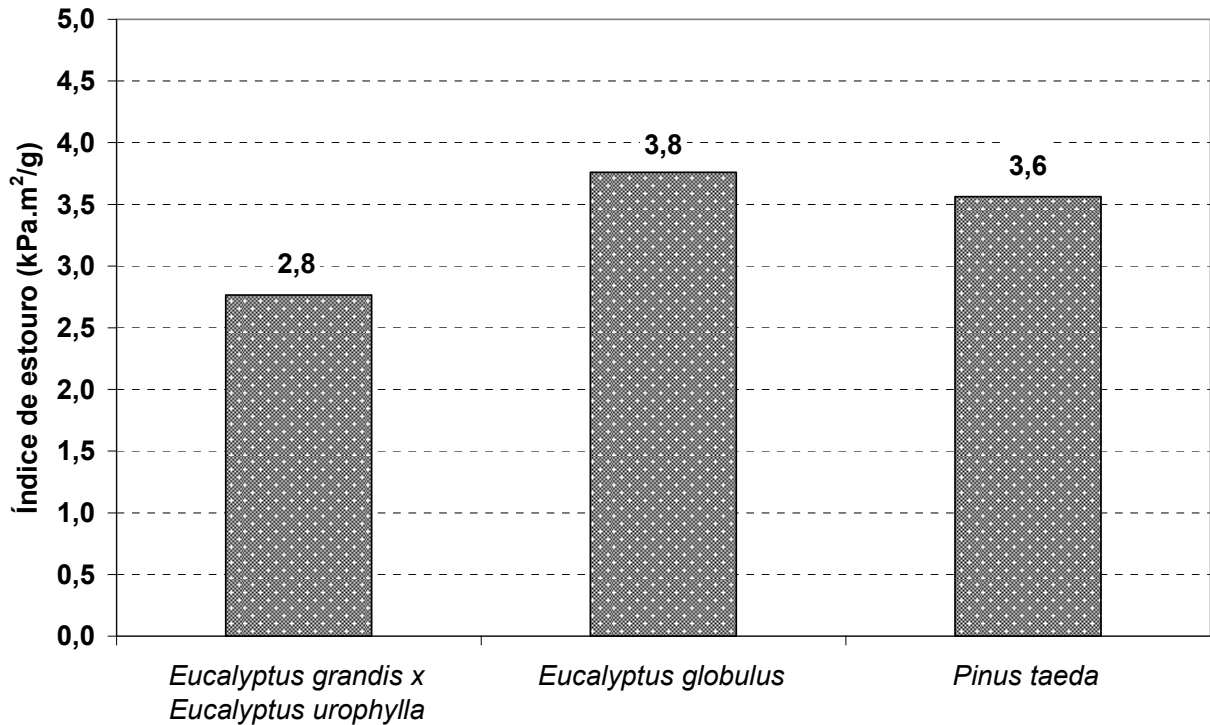


Figura 35 - Índice de estouro em polpas celulósicas obtidas a partir do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*

Verificam-se na figura 35 valores de índice de estouro entre 2,8 a 3,8kPa.m<sup>2</sup>/g, sendo que a polpa celulósica do *Eucalyptus globulus* e do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* apresentam respectivamente o maior e o menor valor. O índice de estouro da polpa celulósica do *Pinus taeda* apresenta um valor de 3,6kPa.m<sup>2</sup>/g, sendo esse valor similar ao índice de estouro obtido na polpa celulósica do *Eucalyptus globulus*.

De acordo com Santos (2002) 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. A autora comenta ainda que existe uma correlação significativa entre tração de polpa não refinada e teor de hemiceluloses na polpa. Isto porque, ao nível não refinado, as ligações interfibras dependem fortemente das hemiceluloses que se encontram depositadas na superfície das fibras.

Dinwoodie (1965) cita que, de forma geral, as características morfológicas das fibras parecem ser mais importantes do que as variáveis químicas, porém, para polpas químicas de folhosas, devido aos altos teores de hemiceluloses e pentosanas presentes nas polpas, não se deve desprezar a influência destes parâmetros sobre a resistência do papel. O autor acrescenta que os três principais fatores que controlam a resistência do papel são: densidade da fibra (espessura da parede celular ou percentual de madeira juvenil), comprimento e resistência da fibra. A resistência da fibra depende de sua composição, cristalinidade, grau de polimerização, área de secção transversal, entre outros, e pode ser estimada através da medida de zero-span.

Apesar de a celulose ser o componente que confere resistência às fibras, polpas celulósicas com elevados teores de celulose e reduzidos teores de hemiceluloses têm menores desenvolvimentos de resistências durante a refinação. Este fato é atribuído quer ao aumento da despolimerização da celulose, quer a necessidade da existência de um nível mínimo de hemiceluloses que permita uma distribuição apropriada das tensões nas paredes das fibras. Além disto, devido ao seu caráter fortemente hidrofílico (conferido pelos grupos hidroxilas e carbonilas ionizáveis) e simultaneamente amorfo, as hemiceluloses promovem a capacidade de absorção de água pelas fibras. Como resultados, a flexibilidade destas aumenta, proporcionando maior área de contato e estabelecendo-se ligações fibra-fibra mais fortes, principalmente devido à maior exposição dos grupos disponíveis para ligação. Desse modo, o teor de hemiceluloses tem forte impacto no desenvolvimento de resistências na folha, devido a sua influência, principalmente, na flexibilidade das fibras. Fibras mais rígidas e com teores mais baixos de hemiceluloses proporcionam uma menor consolidação da estrutura do papel, levando a um menor número de ligações fibra-fibra e a presença de mais espaços vazios. Consequentemente a densidade aparente e os índices de tração e rasgo demonstram um decréscimo (SANTOS, 2002).

A polpa celulósica do *Eucalyptus globulus* apresentou um valor de  $38,18 \times 10^6$  fibras/g e maior teor de hemiceluloses presentes na polpa expressos pela solubilidade em NaOH 5% (S5). Devido a isso, pode-se justificar os valores mais elevados para as resistências à tração e ao estouro obtidas para esse material.

Bugajer e Kuan (1980) realizaram um estudo sobre misturas de polpas celulósicas sulfato branqueadas de eucalipto (brasileira) e pinho (finlandesa) na fabricação de papel. As características físicas das polpas celulósicas sem refino foram avaliadas e os resultados para o eucalipto, com grau de refinação  $16^\circ\text{SR}$  foram:  $10,2\text{N.m/g}$  para índice de tração,  $0,27\text{KPa.m}^2/\text{g}$  para índice de estouro e  $2,37\text{mN.m}^2/\text{g}$  para índice de rasgo. O pinus, com grau de refinação  $15^\circ\text{SR}$  apresentou índice de tração de  $18,7\text{N.m/g}$ , índice de estouro de  $1,02\text{KPa.m}^2/\text{g}$  e índice de rasgo de  $14,7\text{mN.m}^2/\text{g}$ .

Garlet, Andriotti e Sacon (1991) avaliando polpas celulósicas industriais branqueadas kraft de fibra curta de eucalipto brasileira, sulfito fibra longa do Canadá e kraft fibra longa procedente dos EUA, sem refino, obtiveram os seguintes resultados: 5, 18 e  $26\text{mN.m}^2/\text{g}$  para índice de rasgo, 27, 27 e  $22\text{N.m/g}$  para índice de tração e 1,4, 2,2 e 1,2% para alongamento, respectivamente.

Santos (2005) avaliou dois clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* frente ao processo de polpação kraft. As propriedades físico-mecânicas das polpas branqueadas sem refino foram:  $18,5$  e  $17,4^\circ\text{SR}$  para drenabilidade,  $37,81$  e  $23,65\text{N.m/g}$  para índice de tração, 2,80 e 2,78% para alongamento, 2,10 e  $1,08\text{kPa.m}^2/\text{g}$  para índice de estouro e 7,30 e  $4,56\text{mN.m}^2/\text{g}$  para índice de rasgo. A autora cita que um maior grau Schopper Riegler pode ser atribuído a menores valores de "coarseness" das fibras, que conferem uma drenagem mais lenta.

Bassa et al. (2005) avaliou oito clones comerciais híbridos de *Eucalyptus* sp. com relação às características das polpas celulósicas e obteve os seguintes resultados, para polpas celulósicas branqueadas, a  $22^\circ\text{SR}$ : índice de rasgo entre 4,9 e  $6,1\text{mN.m}^2/\text{g}$ , índice de tração entre 33,1 e  $42,8\text{N.m/g}$ , índice de estouro entre 1,5 e  $2,5\text{kPa.m}^2/\text{g}$  e alongamento entre 2,6 e 3%.

Os resultados avaliados no presente trabalho apresentaram índices de tração mais elevados do que os índices reportados pelos autores citados anteriormente. Para

as demais características avaliadas, como índice de rasgo e estouro, alongamento e drenabilidade, os materiais podem ser considerados típicos para as espécies em questão.

Ressalta-se que as diferenças observadas nos testes físicos avaliados nas polpas celulósicas das diferentes espécies, são indicativos de que a mistura entre estas pode ser considerada como uma ferramenta para produção de polpas celulósicas de qualidade diferenciada.

#### **2.3.5.2 Testes físico-mecânicos e drenabilidade das polpas celulósicas das misturas entre *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Pinus taeda* e *Eucalyptus globulus***

Nas tabelas 37, 38 e 39 são apresentados os resultados obtidos nesse estudo, para drenabilidade e testes físico-mecânicos realizados nas polpas celulósicas não refinadas, produzidas a partir das misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda*, o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda* e o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus*.

Tabela 37 - Resultados médios de drenabilidade e dos testes físico-mecânicos efetuados nas polpas celulósicas não refinadas, produzidas a partir das misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Pinus taeda</i>					
% <i>Pinus taeda</i>	Drenabilidade (°SR)	Índice de tração (N.m/g)	Alongamento (%)	Índice de estouro (kPa.m <sup>2</sup> /g)	Índice de rasgo (mN.m <sup>2</sup> /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 38 - Resultados médios de drenabilidade e dos testes físico-mecânicos efetuados nas polpas celulósicas não refinadas, produzidas a partir das misturas entre os materiais *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus globulus</i> + <i>Pinus taeda</i>					
% <i>Pinus taeda</i>	Drenabilidade (°SR)	Índice de tração (N.m/g)	Alongamento (%)	Índice de estouro (kPa.m <sup>2</sup> /g)	Índice de rasgo (mN.m <sup>2</sup> /g)
0	29,0	72,1	2,3	3,8	7,1
10	23,2	66,6	2,3	3,2	7,7
20	25,5	61,9	2,2	3,2	8,8
30	26,0	63,6	2,3	3,4	9,7
40	19,0	55,8	2,3	3,0	10,7
50	23,0	59,7	2,3	3,4	11,5
100	14,8	53,1	2,7	3,6	13,9

Tabela 39 - Resultados médios de drenabilidade e dos testes físico-mecânicos efetuados nas polpas celulósicas não refinadas, produzidas a partir das misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus globulus*, nas proporções de 10 a 50% de *Eucalyptus globulus*

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Eucalyptus globulus</i>					
% <i>Eucalyptus globulus</i>	Drenabilidade (°SR)	Índice de tração (N.m/g)	Alongamento (%)	Índice de estouro (kPa.m <sup>2</sup> /g)	Índice de rasgo (mN.m <sup>2</sup> /g)
0	23,8	64,4	1,5	2,8	7,0
10	24,5	66,0	1,6	2,8	6,8
20	22,5	64,6	1,7	2,8	6,7
30	24,5	67,3	1,8	3,0	7,2
40	21,0	69,2	1,8	3,0	6,7
50	29,2	71,0	1,9	3,4	6,8
100	29,0	72,1	2,3	3,8	7,1

As tabelas 40, 41 e 42 apresentam um resumo da análise estatística dos resultados de drenabilidade e testes físicos das misturas avaliadas nesse trabalho. Nela pode-se visualizar o resultado das análises de variância (significativo ou não), o modelo ajustado, com seus parâmetros a e b e os resultados de correlação obtidos. A análise de variância dos resultados de drenabilidade, alongamento, índice de estouro, rasgo e tração das polpas celulósicas pode ser visualizada nos Apêndices P, Q e R.

Tabela 40 - Resultados da análise estatística dos testes físico-mecânicos realizados nas polpas celulósicas produzidas a partir de misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Pinus taeda</i>					
Parâmetro	Anova	Modelo ajustado	a	b	R <sup>2</sup> (%)
Drenabilidade (°SR)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	23,8965	-0,712209	50,37
Alongamento (%)	Não significativo	-	-	-	-
Índice de rasgo (mNm <sup>2</sup> /g)	Significativo	$Y = 1/(a + bx)$	0,148122	-0,00117712	88,55
Índice de tração (Nm/g)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	62,5322	-2,01259	74,90
Índice de estouro (kPam <sup>2</sup> /g)	Não significativo	-	-	-	-

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

Tabela 41 - Resultados da análise estatística dos testes físico-mecânicos realizados nas polpas celulósicas produzidas a partir de misturas entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda*

<i>Eucalyptus globulus</i> + <i>Pinus taeda</i>					
Parâmetro	Anova	Modelo ajustado	a	b	R <sup>2</sup> (%)
Drenabilidade (°SR)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	28,4732	-0,946495	33,02
Alongamento (%)	Não significativo	-	-	-	-
Índice de rasgo (mNm <sup>2</sup> /g)	Significativo	$Y = a + bx$	6,95524	0,0916571	97,67
Índice de tração (Nm/g)	Significativo	$Y = a + b\sqrt{x}$	72,2605	-2,02786	70,96
Índice de estouro (kPam <sup>2</sup> /g)	Não significativo	-	-	-	-

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

Tabela 42 - Resultados da análise estatística dos testes físico-mecânicos realizados nas polpas celulósicas produzidas a partir de misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus*

<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> + <i>Eucalyptus globulus</i>					
Parâmetro	Anova	Modelo ajustado	a	b	R <sup>2</sup> (%)
Drenabilidade (°SR)	Não significativo	-	-	-	-
Alongamento (%)	Significativo	$Y = 1/(a + bx)$	0,646043	-0,0023613	58,16
Índice de rasgo (mN.m <sup>2</sup> /g)	Não significativo	-	-	-	-
Índice de tração (N.m/g)	Não significativo	-	-	-	-
Índice de estouro (kPa.m <sup>2</sup> /g)	Significativo	$Y = 1/(a + bx)$	0,373123	-0,0012472	48,53

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

Para permitir uma melhor visualização e interpretação dos dados apresentados nas tabelas 37, 38 e 39 os resultados das misturas foram plotados juntos. O eixo das ordenadas representa a porcentagem de *Pinus taeda* nas misturas com o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e com o *Eucalyptus globulus*, e também a porcentagem do *Eucalyptus globulus* nas misturas com o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

Na figura 36 são apresentados os resultados drenabilidade das polpas celulósicas, nas misturas avaliadas.

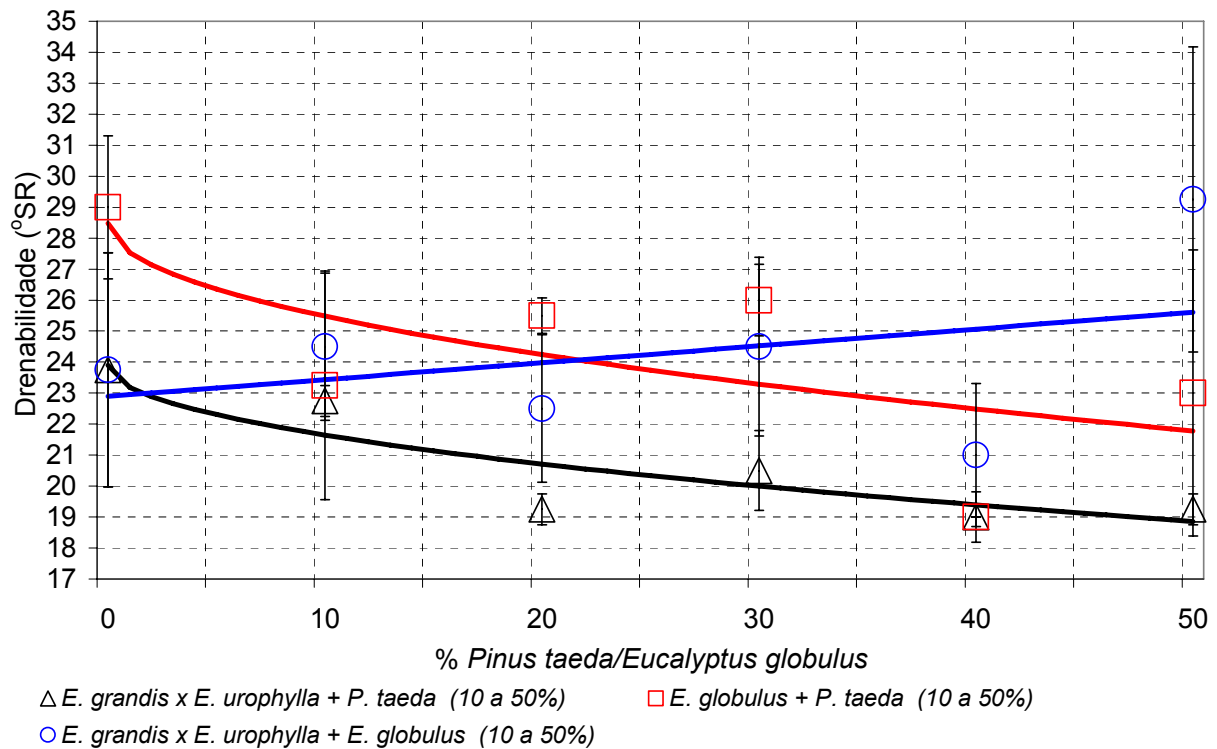


Figura 36 - Drenabilidade em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

O comportamento observado para o parâmetro drenabilidade está de acordo com os valores obtidos nos materiais puros, onde a polpa celulósica do *Eucalyptus globulus* apresentou uma drenabilidade de 29,0°SR, a do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* 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.

Nas misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus globulus* o comportamento observado é inverso. Ou seja, à medida que aumenta a proporção de *Eucalyptus globulus* nas misturas, verificam-se maiores números de fibras por grama e maior solubilidade em NaOH 5% (S5), características que proporcionam maior número de ligações interfibras e elevam a drenabilidade das polpas celulósicas.



Desse modo, a drenabilidade das misturas sofre um decréscimo com a adição de *Pinus taeda* aos *Eucalyptus* e sofre um acréscimo com o aumento da participação de *Eucalyptus globulus* na mistura com o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

A polpa celulósica proveniente da mistura entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda* apresenta valores de drenabilidade superiores à polpa celulósica proveniente da mistura entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda* para todos os tratamentos avaliados. Isto ocorre devido ao maior número de fibras por grama e maior solubilidade em NaOH 5% (S5) nessas misturas e à maior drenabilidade observada para a polpa celulósica do *Eucalyptus globulus*.

Os resultados de drenabilidade das misturas consideradas neste trabalho mostram que adição de *Pinus taeda* ao eucalipto reduz a drenabilidade da polpa celulósica, o que pode ter como reflexos positivos, a possibilidade de aumento de velocidade de máquinas secadoras e/ou redução do teor de umidade da polpa celulósica, para um mesmo ritmo de produção. Entretanto, o acréscimo de drenabilidade observado para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus* pode ter efeito negativo em máquinas secadoras de polpa celulósica e ocasionar perdas de produtividade devido à menor velocidade de operação, e/ou aumento do teor de umidade da polpa celulósica.

Os resultados de alongamento podem ser observados na figura 37.

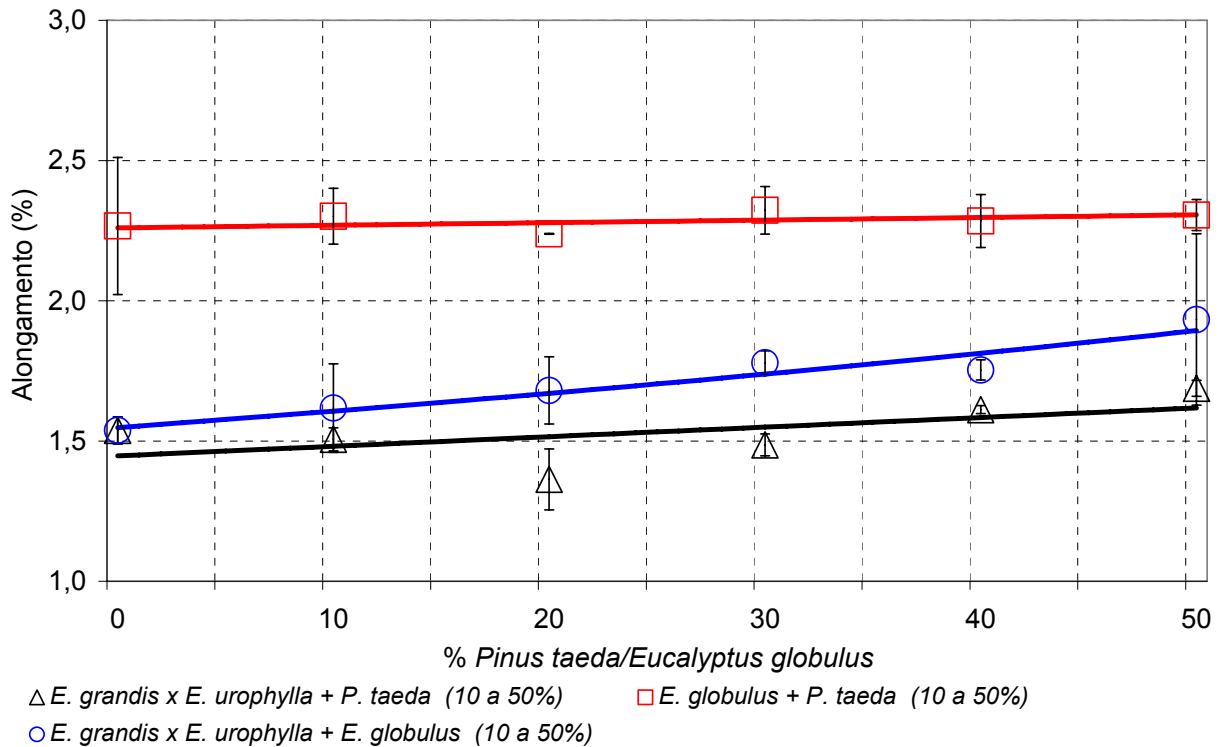


Figura 37 - Alongamento em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

As misturas do *Eucalyptus globulus* com o *Pinus taeda* apresentam a maior resistência ao alongamento, entre todas as misturas e proporções testadas e nota-se uma tendência de estabilidade do alongamento, à medida que aumenta a proporção do *Pinus taeda* na mistura, com valores entre 2,2 e 2,3%. Para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda* também é verificado um comportamento de estabilidade, com valores entre 1,5 e 1,7%. Entretanto, para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus* observa-se uma tendência de elevação do alongamento, partido de cerca 1,5% e alcançando valores de 1,9%,

As polpas celulósicas individuais apresentaram alongamento de 1,5, 2,3 e 2,7%, respectivamente para os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*. Justifica-se o maior valor observado para alongamento nas misturas entre o *Eucalyptus globulus* com o *Pinus taeda* pelos valores obtidos nas polpas celulósicas individuais. Pelo comportamento de estabilidade verificado para o parâmetro alongamento nas misturas entre o *Pinus taeda* e os

*Eucalyptus*, pode-se dizer que este não foi influenciado pela proporção de *Pinus taeda* entre 10 e 50% nas misturas.

Os resultados de índice de rasgo podem ser visualizados na figura 38.

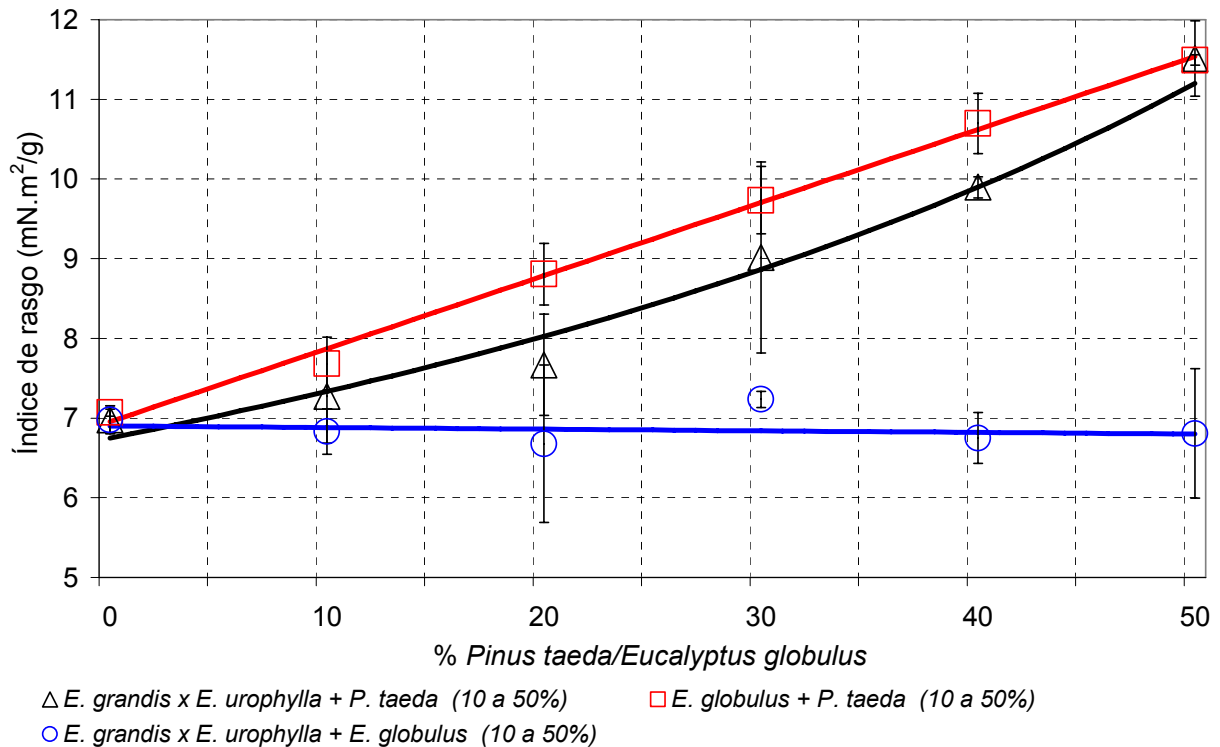


Figura 38 - Índice de rasgo em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

Verifica-se um incremento na resistência ao rasgo com a adição de *Pinus taeda* aos *Eucalyptus*. Os valores obtidos nas misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda* variam entre 7,3 a 11,5mN.m<sup>2</sup>/g e nas misturas entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda* estes variaram entre 7,7 a 11,5mN.m<sup>2</sup>/g.

A adição de 10% e 20% de *Pinus taeda* ao *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* promoveu respectivamente um incremento médio de 4,2 e 10% na resistência ao rasgo, enquanto a adição de 10 e 20% de *Pinus taeda* ao *Eucalyptus globulus* promoveu respectivamente um incremento médio de 8,4 e 23,9%. A partir desses resultados, pode-se afirmar que o ganho de resistência ao rasgo na mistura entre o *Pinus taeda* e o *Eucalyptus globulus* foi mais elevado. Isso pode ocorrer devido ao maior número de ligações interfibras presentes na polpa celulósica de *Eucalyptus globulus*, quando comparado à polpa celulósica de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus*

*urophylla*. Entretanto, a superioridade da resistência ao rasgo para mistura entre o *Pinus taeda* e o *Eucalyptus globulus* ocorre até a mistura de 50%, quando os valores de resistência ao rasgo ficam iguais para ambas as misturas. Um fato que pode explicar esse comportamento é que com uma proporção mais elevada de *Pinus taeda* na mistura, o comprimento das fibras passa a ser o fator responsável por esse comportamento.

Os resultados obtidos confirmam que as polpas celulósicas avaliadas apresentam características diferenciadas e conseqüentemente, levam a obtenção de produtos diferenciados. Polpas celulósicas com maiores resistências ao rasgo permitem que as máquinas de papel operem a uma velocidade maior e conseqüentemente aumentem a produção de uma unidade industrial. Essa característica pode viabilizar também a produção de papéis de menor gramatura, papéis especiais, papéis base para couche, entre outros.

O pronunciado aumento na resistência ao rasgo obtido quando da mistura da celulose de conífera com celulose de folhosa pode ser explicado da seguinte forma: durante o ensaio de resistência ao rasgo, um certo número de fibras são quebradas pelo esforço, enquanto outras fibras são arrancadas inteiras da estrutura da folha. A energia necessária para quebrar uma fibra é geralmente bem inferior àquela para extrair a fibra intacta da folha. Evidentemente, quanto maior a fibra, maior é o trabalho necessário para arrancá-la do corpo do papel (FOELKEL; BARRICHELO, 1975b). Ressalta-se que para as misturas avaliadas neste trabalho não foram efetuadas misturas de celuloses, mas sim misturas de cavacos antes do processo de polpação.

A figura 39 apresenta os resultados de índice de tração das misturas avaliadas.

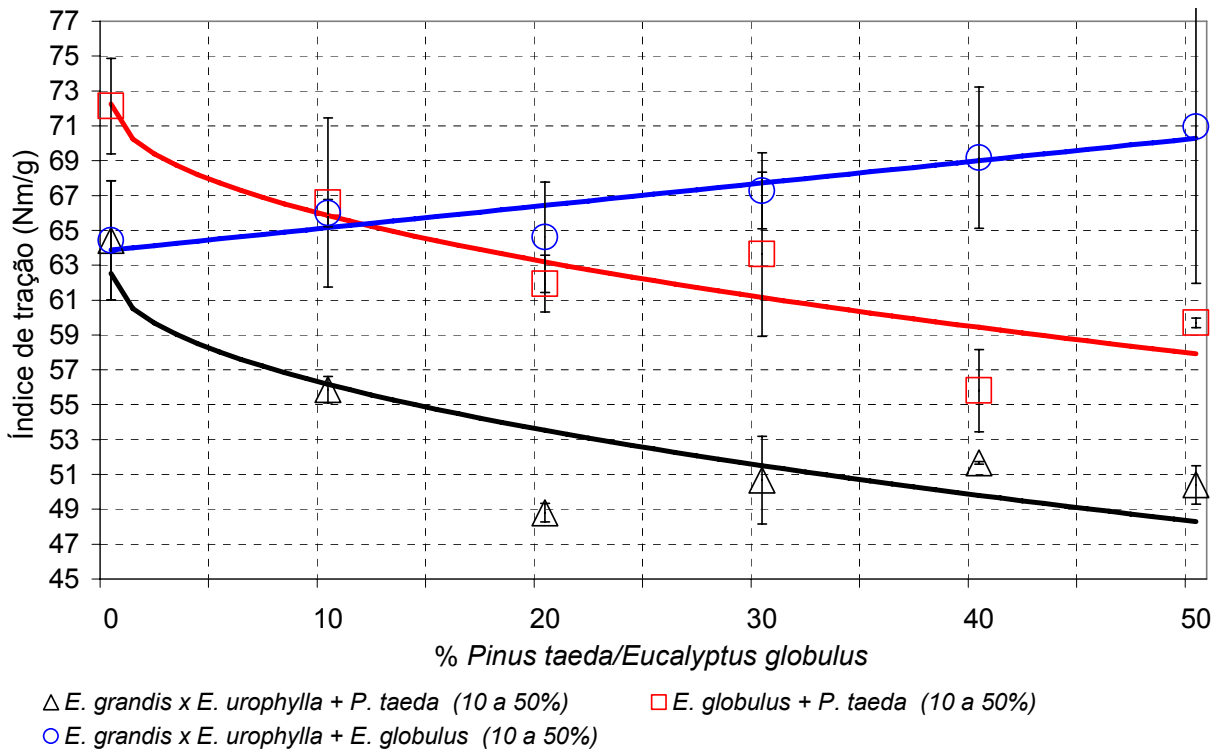


Figura 39 - Índice de tração em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

Observa-se uma queda dos valores de índice de tração nas misturas entre os *Eucalyptus* e o *Pinus taeda*, com o aumento da proporção de *Pinus taeda* nas misturas, sendo que as polpas celulósicas provenientes das misturas entre o *Eucalyptus globulus* e o *Pinus taeda* apresentam maiores valores de tração, para todas as proporções testadas, quando comparadas às misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Pinus taeda*. Para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus* o comportamento observado foi uma tendência de aumento do índice de tração com o aumento da proporção de *Eucalyptus globulus* nas misturas.

Vale ressaltar que as misturas entre os *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 conseqüência, pode-se supor que o número de ligações interfibras foi reduzido, e conseqüentemente, as resistências das polpas celulósicas sofreram um decréscimo. Para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus*

*globulus*, à medida que aumenta a proporção de *Eucalyptus globulus* nas misturas, verificam-se maiores números de fibras por grama e maior solubilidade em NaOH 5% (S5), características que proporcionam maior número de ligações interfibras que conseqüentemente aumentam as resistências à tração e ao estouro, pois estas características são fortemente dependentes das ligações interfibras.

A figura 40 apresenta os resultados obtidos para o parâmetro índice de estouro.

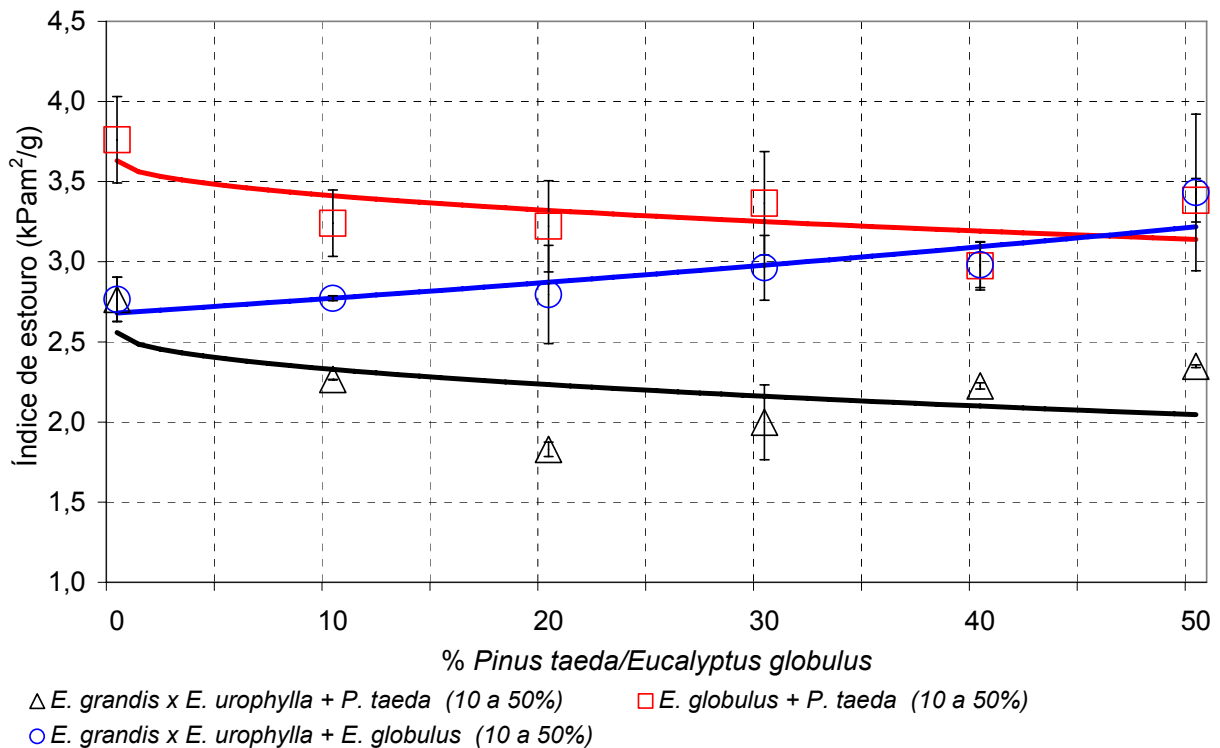


Figura 40 - Índice de estouro em função da espécie / proporção utilizada nas misturas entre espécies

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 os *Eucalyptus*. Novamente faz-se referência aos valores de 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* aos *Eucalyptus*.

Para as misturas entre o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus globulus*, o comportamento observado foi uma tendência de aumento do

índice de estouro, com o aumento da proporção de *Eucalyptus globulus* nas misturas. À medida que aumenta a proporção de *Eucalyptus globulus* nas misturas, verificam-se maiores números de fibras por grama e maior solubilidade em NaOH 5% (S5), características que proporcionam maior número de ligações interfibras e aumentam as resistências à tração e ao estouro.

Oliveira, Foelkel e Gomide (1981) realizaram misturas de madeiras de *Pinus strobus* e *Eucalyptus urophylla* em quatro proporções, sendo elas: 100% de eucalipto, 33,33% de pinus (66,66% de eucalipto), 66,66% de pinus (33,33% de eucalipto) e 100% de pinus. Foram avaliadas as propriedades físico-mecânicas das polpas celulósicas produzidas pelo processo kraft convencional, e os resultados indicaram um aumento da resistência à tração nos baixos graus de refino (20°SR), com o aumento da percentagem de fibras longas na mistura. Para resistência ao rasgo, foi observada ação significativa com o aumento da percentagem de pinus, pois os resultados demonstraram um aumento significativo dessa resistência.

Foelkel e Barrichelo (1975b) testaram misturas de polpas celulósicas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *caribaea*, com graus de moagem de 23 e 25°SR, respectivamente, nas proporções de 100% de polpa celulósica de *Eucalyptus saligna*, 80% de polpa celulósica de *Eucalyptus saligna* e 20% de polpa celulósica de *Pinus caribaea*, 60% de polpa celulósica de *Eucalyptus saligna* e 40% de polpa celulósica de *Pinus caribaea*, 40% de polpa celulósica de *Eucalyptus saligna* e 60% de polpa celulósica de *Pinus caribaea*, 20% de polpa celulósica de *Eucalyptus saligna* e 80% de polpa celulósica de *Pinus caribaea* e 100% de polpa celulósica de *Pinus caribaea*. Os resultados obtidos para índice de rasgo indicaram um pronunciado aumento quando da mistura da celulose de conífera com celulose de folhosa, enquanto para as resistências à tração e ao arrebentamento observaram-se modelos de variação inversos em relação à resistência ao rasgo.

Foelkel e Barrichelo (1974) avaliaram polpas celulósicas de *Araucaria angustifolia* quando substituída parcialmente por celulose sulfato de *Eucalyptus saligna* nas proporções 90:10, 80:20, 70:30% de polpa celulósica de *Araucaria angustifolia* e *Eucalyptus saligna*, respectivamente. A polpa celulósica de *Araucaria angustifolia* foi refinada a 16°SR e a de *Eucalyptus saligna* a 31°SR. Os resultados de resistência à

tração indicam que a substituição por polpa celulósica de *Eucalyptus saligna* colaborou para um aumento dessa propriedade, em relação à polpa celulósica pura de *Araucaria angustifolia*. Os tratamentos com 100% das polpas avaliadas constituíram-se nos dois extremos para os valores de resistência à tração, sendo o tratamento com 100% de polpa celulósica de *Araucaria angustifolia* o inferior e o tratamento com 100% de polpa celulósica de *Eucalyptus saligna* superior para essa propriedade. Relativamente à resistência ao arrebentamento, notou-se que substituições de até 20% de polpa celulósica de *Eucalyptus saligna* não provocaram aumentos significativos, porém a incorporação de 30% desta polpa celulósica melhorou significativamente esta propriedade, com relação à celulose pura de *Araucaria angustifolia*. A resistência ao rasgo diminuiu significativamente mesmo com a substituição de quantidade muito pequena por polpa celulósica de *Eucalyptus saligna*. Os autores comentam que quando excepcionalmente alta resistência ao rasgo é desejada, torna-se desaconselhável a mistura nas proporções estudadas neste trabalho. Em termos práticos, porém, as diferenças de resistência entre os tratamentos testados, com exceção do 100% polpa celulósica de *Eucalyptus saligna*, não são problemáticas para muitas utilizações do produto final.

As tendências observadas no presente trabalho, de queda nas propriedades de resistência à tração e ao estouro e aumento da resistência ao rasgo, com a adição de *Pinus taeda* aos *Eucalyptus* estão de acordo com autores que avaliaram misturas de polpas celulósicas de espécies de fibras longas e curtas, citados anteriormente, embora para resistência à tração tenham sido obtidos também resultados de estabilidade ou aumento dessa propriedade, conforme o tratamento realizado pelos autores.

Os resultados obtidos para misturas entre os *Eucalyptus* e o *Pinus taeda* mostraram que essas misturas dão origem a polpas celulósicas de menor drenabilidade, tração e estouro, e maior resistência ao rasgo. Essas propriedades diferenciadas, principalmente a maior resistência ao rasgo, podem interessar a produtores de papel que desejam aumentar a produção de suas máquinas, pois a utilização de tal polpa celulósica permitirá atingir uma maior velocidade nas máquinas de papel, ou ainda a produtores de papel que desejam ter em seu catálogo de produtos um papel diferenciado.



A adição de 10% de cavacos de *Pinus taeda* aos *Eucalyptus* permite um ganho significativo no índice de rasgo, que ocasiona os benefícios citados anteriormente, e ainda permite a obtenção de rendimento em polpa maior ou igual a 50%. Entretanto, a quantidade de fibra de *Pinus taeda* a ser adicionada vai depender do tipo de produto que se quer colocar no mercado e das condições operacionais de cada unidade produtora.

### 3 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- Para o presente estudo, os materiais e misturas avaliadas foram submetidas ao processo de polpação Lo-solids<sup>®</sup>, onde foram empregadas condições padrões de operação para os híbridos de eucalipto brasileiros. Ressalta-se que otimizações na etapa de polpação Lo-Solids<sup>®</sup> podem levar a maximização dos resultados de polpação obtidos para o *Pinus taeda* e também para o *Eucalyptus globulus*.
- Para as misturas entre os *Eucalyptus* e o *Pinus taeda*, à medida que a proporção de *Pinus taeda* aumenta, é necessário aumentar a carga alcalina e o fator H para manter níveis de deslignificação que permitam o branqueamento posterior da polpa celulósica. Os teores de álcali efetivo aplicado (%NaOH) variaram entre 19,3 e 21,3% e o fator H aplicado situou-se entre 970 e 1420.
- À medida que a proporção de cavacos de *Pinus taeda* aumenta nas misturas com os *Eucalyptus*, o rendimento em polpa celulósica sofre um decréscimo. Os valores de rendimento depurado observados para as misturas variaram entre 51,3 e 46,8%.
- Com o aumento da participação de *Pinus taeda* nas misturas com os *Eucalyptus*, verifica-se um incremento na geração de sólidos secos por tonelada de celulose produzida. Esse fato impacta diretamente na capacidade de produção de uma unidade industrial.
- O consumo específico de madeira aumenta com o aumento da participação de cavacos de *Pinus taeda* nas misturas.
- O *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* apresentou melhores resultados nas análises de polpação, como carga alcalina mais baixa, maior rendimento bruto e depurado e maior viscosidade da polpa celulósica quando comparado ao *Eucalyptus globulus*. Como consequência, nas misturas entre os *Eucalyptus*, observou-se uma tendência de queda dos rendimentos bruto e depurado e da viscosidade da polpa celulósica.

- À medida que a proporção de cavacos de *Pinus taeda* aumenta na mistura, o teor de ácidos hexenurônicos das polpas celulósicas sofre um decréscimo, com valores entre 56,59 e 39,57 $\mu$ mol/g.
- A adição de *Pinus taeda* aos *Eucalyptus* provoca redução do S5 com valores entre 14,7 e 9,16% .
- A participação de *Pinus taeda* em mistura com os *Eucalyptus*, ocasiona aumento do comprimento médio das fibras das polpas celulósicas. Os valores observados variaram entre 0,86 e 1,13mm.
- Ao comparar os *Eucalyptus* avaliados, verifica-se que tanto para comprimento como para largura da fibra, o *Eucalyptus globulus* apresenta dimensões inferiores quando comparado ao *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Consequentemente, o *Eucalyptus globulus* apresenta menor coarseness e maior número de fibras por grama.
- A adição de *Pinus taeda* aos *Eucalyptus* ocasiona um aumento do coarseness e consequentemente um decréscimo no número de fibras por grama, uma vez que são características inversamente proporcionais.
- À medida que se acrescenta *Pinus taeda* aos *Eucalyptus*, a drenabilidade das polpas celulósicas sofre um decréscimo, com valores entre 25,5 e 19 °SR.
- Com o aumento da participação de *Pinus taeda* nas misturas verifica-se um incremento no índice de rasgo. Com o acréscimo de 10% de cavacos de *Pinus taeda* aos cavacos de *Eucalyptus* foram observados incrementos de resistência ao rasgo de 4,2 e 10%, conforme a espécie de *Eucalyptus*. Com o acréscimo de 20% de cavacos de *Pinus taeda* aos cavacos de *Eucalyptus* os incrementos de resistência ao rasgo chegaram a 23,9% .
- À medida que se acrescenta *Pinus taeda* aos *Eucalyptus* o índice de tração das polpas celulósicas sofre um decréscimo, com valores entre 66,6 e 48,8N.m/g.
- Com base nos resultados obtidos, 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. Entretanto, a quantidade de fibra de *Pinus taeda* a ser adicionada vai depender do tipo de produto que se quer colocar no mercado e das condições operacionais de cada unidade produtora.

- A perda de rendimento em polpa celulósica observada pela adição de *Pinus taeda* aos *Eucalyptus*, em proporções maiores que 10%, pode inviabilizar o processo, a menos que os ganhos de qualidade sejam excelentes. Pois, a redução no rendimento em polpa ocasionará um maior consumo de madeira e redução da capacidade de produção de uma unidade industrial. As perdas serão ainda maiores se o objetivo for a produção de polpa celulósica branqueada, pois o gasto com químicos no processo de branqueamento será maior, bem como a geração de poluição.
- 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

- ALENCAR, G.S.B. **Estudo da qualidade da madeira para produção de celulose relacionada à precocidade na seleção de híbrido *E. grandis* x *E. urophylla***. 2002. 145 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- ALMEIDA, F.S. **Influência da carga alcalina no processo de polpação Lo-solids® para madeiras de eucalipto**. 2003. 115 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- ALMEIDA, J.M. de. **Estudos de maximização de rendimento e monitoramento da degradação dos constituintes da madeira de *Eucalyptus* em processo kraft contínuo**. 1999. 140 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.
- ALMEIDA, J.M. de; GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; SILVA, D.J. Estudo de alternativas técnicas para aumento de rendimento da polpação kraft contínua de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 333-340, 2000.
- BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O. **A madeira das espécies de eucalipto como matéria-prima para a indústria de celulose e papel**. Projeto de Desenvolvimento e Pesquisa Florestal – PRODEPEF. PNUD/FAO/IBDF/BRA – 45.1976 (Série Divulgação 13). 145 p.
- BARRICHELO, L.E.G.; FOELKEL, C.E.B. Produção de celulose sulfato a partir de misturas de madeira de *Eucalyptus saligna* com pequenas proporções de cavacos de *Bambusa vulgaris* var. *vitatta*. **IPEF**, Piracicaba, n.10, p. 93-99, 1975.
- BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O.; COUTO, H.T.Z. A madeira de *Pinus caribaea* var *hondurensis* como matéria prima para produção. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 11., 1978, São Paulo. **Trabalhos técnicos ...** São Paulo: ABCP, 1978. p.133-139.
- BARRICHELO, L.E.G.; KAGEYAMA, P.Y.; SPELTZ, R.M.; BONISH, H.S.; BRITO; J.O.; FERREIRA, M. Estudos de procedências de *Pinus taeda* visando aproveitamento industrial. **IPEF**, Piracicaba, n.15, p. 1-14, 1977.
- BASSA, A. **Processos de polpação kraft convencional e modificado de madeiras de *E. grandis* e Híbrido (*E. grandis* x *E. urophylla*)**. 2002. 103 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

- BASSA, A.; BASSA, A.G.M.C; SACON, V.M; VALLE, C.F. Seleção e caracterização de clones de eucalipto considerando parâmetros silviculturais, tecnológicos e de produto final. In: INTERNACIONAL COLLOQUIUM ON EUCALYPTUS PULP, 2., 2005, Concepción. **Anais ...** Concepción: Universidad de Concepción, 2005. p. 1-20.
- BUCHERT, J.; LAINE, J.; TENKANEN, M.; VUORINEN, T.; VIIKARI, L. Characterization of uronic acids during kraft and superbatches pulping". In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WOOD PULPING CHEMISTRY, 1997, 9., Montreal. **Proceedings ...** Montreal: CPPA, Tech. Sect., 1997.
- BUCHERT, J.; TELEMANN, A.; HARJUNPÄÄ, V.; TENKANEN, M.; VIIKARI, L.; VUORINEN, T. Effect of cooking and bleaching on the structure of xylan in conventional pine kraft pulp. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 78, n. 11, p. 125-130, 1995.
- BUGAJER, S.; KUANG, G.S.S. Comportamento de misturas de pastas celulósicas de eucalipto e pinho na fabricação de papel. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 1980, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: ABCP, 1980. p. 53-65.
- BUGAJER, S.; CAHEN, R.; LIMA, A.F.; PINHO, M.R.R. Fator H – parâmetro válido para a polpação de eucalipto? **O Papel**, São Paulo, v. 40, n. 3, p. 35-49, 1979.
- CARDOSO, V.C.; FRIZZO, S.M.B.; ROSA, C.A.B.; FOELKEL, C.E.B.; ASSIS, T.F. Otimização das condições do cozimento Kraft de *Eucalyptus globulus* em função do teor de lignina na madeira. In: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, ABTCP, 2002, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: ABTCP, 2002. p. 1-19.
- CARNEIRO, C.J.G.; SANTOS, C.A.S.A.; MANFREDI, V. Caracterização da variabilidade longitudinal da árvore visando à produção de celulose. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, ABTCP, 1997, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: ABTCP, 1997. p. 271-280.
- CARVALHO, A.M.M.L.; VITAL, B.R.; GOMIDE, J.L. Efeito da impregnação da madeira de *Eucalyptus grandis* com sais ignífugos na produção e na qualidade do carvão. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 22, p. 253-262, abr./jun. 1998.
- CHAI, X.-S.; YOON, S.-H.; LI, J. The fate of hexenuronic acid groups during alkaline pulping of loblolly pine. **Journal of Pulp and Paper Science**, Montreal, v. 27, n. 12, p. 407-411, 2001a.
- 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, 2001b.
- CHAI, X.-S.; LUO, Q.; YOON, S.-H.; ZHU, J.Y. The fate of hexenuronic acid groups during kraft pulping of hardwoods. **Journal of Pulp and Paper Science**, Montreal, v.27, n.12, p.403-406, 2001c.

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.

CHIANG, V.L.; PUUMALA, R.J.; TAKEUCHI, H.; ECKERT, R.E. Comparison of softwood and hardwood kraft pulping. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 71, n. 9, p. 173-176, 1988.

COLODETTE, J.L.; GOMIDE, J.L. **ENF 551 – Estrutura anatômica e Química da madeira**. Curso de Pós-graduação *lato sensu* em tecnologia de celulose e papel, Módulo I. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, Laboratório de Celulose e Papel. Viçosa, 2001. 1v.

CONNELL, D.; BJÖRKLUND, M.; FORSSTRÖM, A. Relationship between the pulp yield, bleachability and cooking conditions of Loblolly pine. In: 2006 TAPPI ENGINEERING, PULPING AND ENVIRONMENTAL CONFERENCE, Atlanta. **Proceedings ...** Atlanta: TAPPI, 2006. p. 1-12.

COSTA, M.M.; MOUNTEER, A.H. COLODETTE, J.L. Ácidos hexenurônicos parte I: origem, quantificação, reatividade e comportamento durante a polpação kraft. **O Papel**, São Paulo, v. 57, n. 5, p. 75-85, maio 2001a.

COSTA, M.M.; MOUNTEER, A.H. COLODETTE, J.L. Ácidos hexenurônicos parte II: remoção e impacto na branqueabilidade e qualidade de polpa e no processo de branqueamento. **O Papel**, São Paulo, v. 62, n. 6, p. 77-84, jun. 2001b.

DANIEL, A.I.D.; PASCHOAL NETO, C.; EVTUGUIN, D.V.; SILVESTRE, A.J.D. Hexenuronic acid contents of *eucalyptus globulus* kraft pulps: variation with pulping conditions and effect on ecf bleachability. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 2, n. 5, p. 3-8, 2003.

DINWOODIE, J.M. The relationship between fiber morphology and paper properties: a review of literature. **Tappi**, Atlanta, v. 48, n. 8, p. 440-447, Aug. 1965.

EK, M.; GUSTAVSSON, C.; KADIRIC, J.; TEDER, A. Formation and dissolution/degradation of hexenuronic acids during kraft pulping of *Eucalyptus globulus*. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF LIGNINS AND OTHER WOOD COMPONENTS, 7., 2001, Belo Horizonte. **Proceedings ...** Viçosa: UFV, 2001. p. 99-106.

FOELKEL, C.E.B. **Estrutura da madeira**. Belo Oriente: Cenibra. 1977. 84 p.

FOELKEL, C.E.E.; BARRICHELO, L.E.G. Variação nas propriedades físico-mecânicas da celulose Kraft de *Araucaria angustifolia* quando substituída parcialmente por celulose sulfato de *Eucalyptus saligna*. In: CONVENÇÃO ANUAL DA AECF, 1974, São Paulo. **Trabalhos técnicos ...** São Paulo: ABTCP, 1974. p. 131-135.

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, 1975a. p. 15-20.

FOELKEL, C.E.B.; BARRICHELO, L.E.G. Mistura de celuloses de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *caribaea*. **IPEF**, Piracicaba, n. 10, p. 63-76, 1975b

FOELKEL, C.E.B.; BARRICHELO, L.E.G. Misturas de celuloses. In: \_\_\_\_\_. **Tecnologia de celulose e papel**. Piracicaba: ESALQ, 1975c. p.161-163.

FOELKEL, C.E.B.; BARRICHELO, L.E.G. Relações entre características da madeira e propriedades da celulose e papel. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 8, 1975, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: ABCP, 1975d. p. 40-53.

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, ago. 1972.

GARLET, V.N.; ANDRIOTTI, V.; SACON, V. Misturas de fibras curtas e longas: influência da fibra do eucalipto nas propriedades do papel. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 1991, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: ABTCP, 1991. p. 37-51.

GELLERSTEDT, G.; LI, J. An HPLC method for the quantitative determination of hexenuronic acid groups in chemical pulps. **Carbohydrate Research**, Amsterdam, v. 294, p. 41-51, 1996.

GIERER, J. Chemical aspects of kraft pulping. **Wood Science and Technology**, New York, v. 14. p. 241-266, 1980.

GOMIDE, J.L. Reação dos carboidratos e dissolução dos constituintes da madeira, durante polpação alcalina. **O Papel**, São Paulo, v. 40, n. 11, p. 119-128, nov. 1979.

GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L. **Apostila de estruturas anatômica e química das madeiras**. Curso de Pós-Graduação *Latu sensu* em Tecnologia de Celulose e Papel. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, Laboratório de Celulose e Papel, 2001. 1 v.

GOMIDE, J.L.; FANTUZZI NETO, H. Aspectos fundamentais da polpação kraft de madeira de *Eucalyptus*. **O Papel**, São Paulo, v. 61, n. 3, p. 62-68, mar. 2000.

GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C.; SILVA, C.M. Calidad de las maderas de clones de *Eucalyptus* de Brasil para la producción de celulosa kraft. In:



INTERNACIONAL COLLOQUIUM ON EUCALYPTUS PULP, 2., 2005, Concepción.  
**Anais ...** Concepción: Universidad de Concepción, 2005. p. 1-17.

GONZAGA, J.V.; BUSNARDO, C.A.; DIAS, C.; FOELKEL, C.E.B. Estudo comparativo da qualidade da madeira de duas procedências de *Eucalyptus camaldulensis* e uma de *Eucalyptus globulus* introduzidas na região de Guaíba – RS. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL – SEMANA DO PAPEL, 1984, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: ABCP, 1984. p. 325-357.

GUSTAVSSON, C.A-S.; AL-DAJANI, W.W. The influence of cooking conditions on the degradation of hexenuronic acid, xylan, glucomannan and cellulose during kraft pulping of softwood. **Nordic Pulp Paper Research**, Stockholm, v. 15, n. 2, p. 100-167, 2000.

HORTAL, J.G. Constituyents fibrosos de pastas y papeles. In: \_\_\_\_\_.  
**Propiedades de las fibras celulósicas.** Terrassa: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Terrassa, 1998. cap. 2, p. 28-36.

IRVINE, M.G.; CLARK, N.B. Extended delignification of mature and plantation eucalypt wood. In: INTERNATIONAL PAN PACIFIC CONFERENCE, 1994, San Diego.  
**Proceedings ...**San Diego: TAPPI, 1994. v. 1, p. 61-71.

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.

KIBBLEWHITE, R.P.; JOHNSON, B.I.; SHELBOURNE, C.J.A. Kraft pulp qualities of *Eucalyptus nitens*, *E. globulus* and *E. maidenii*, at ages 8 and 11 years. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 30, n. 3, p. 447-457, 2000.

LI, J.; GELLERSTEDT, G. The contribution to kappa number from hexenuronic acid groups in pulp xylan. **Carbohydrate Research**, Amsterdam, v. 392, p. 213-218, 1997.

MENDES, C.J. Influência da idade em *Pinus taeda* sobre a qualidade da madeira para produção de celulose. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 9, n. 27, p. 91-90, 1993.

MIRANDA, C.R.; BARRICHELO, L.E.G. Celulose de madeira de *E. citriodora*: influência do tamanho de cavacos. **O Papel**, São Paulo, v. 52, n. 12, p.119-139, dez. 1991.

MOKFIENSKI, A.; GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C. Importância da densidade e do teor de carboidratos totais da madeira de eucalipto no desempenho da linha de fibra. In: COLÓQUIO INTERNACIONAL SOBRE CELULOSE KRAFT DE EUCALIPTO, 2003, Viçosa. **Colóquio ...**Viçosa: UFV, 2003. p. 15-38.

MONTANARI, S.; CURVELO, A.A.S.; DE GROOTE, R.A.M.C. Deslignificação organossolve de *Pinus caribaea hondurensis* relação entre número kappa e lignina

klason. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 1991, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: ABTCP, 1991. p. 137-151.

OLIVEIRA, R.C. **Apostila de tecnologia e propriedades do papel.** Curso de Pós-Graduação *Latu sensu* em Tecnologia de Celulose e Papel. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, Laboratório de Celulose e Papel, 2001. 1 v.

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, jan. 1981.

PASCHOAL NETO, C.; EVTUGUIN, D.; PAULINO, P.P. Effect of polyphenolic extractives on the quantification and structural characterization of the lignin of *Eucalyptus globulus*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WOOD AND PULPING CHEMISTRY, 9., 1997, Montreal. **Proceedings ...** Montreal: ISWPC, 1997. p. 78-84

PEDROSO, A.I.; CARVALHO, M.G. Alkaline pulping of portuguese *Eucalyptus globulus*: effect on hexenuronic acid content. **Journal of Pulp and Paper Science**, Montreal, v. 29, n. 5 p. 150-154, May 2003.

PEREZ, J.F.R. **Avaliação de procedências de *Eucalyptus globulus ssp globulus* segundo a qualidade da madeira para a produção de celulose.** 2002. 93 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

PETRIK, A.W.; BUSNARDO, C.A.; GONZAGA, J.V.; MILANEZ, A.F. Produção de celulose kraft a partir de misturas de madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Acacia mearnsii*. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 1984, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1984. p. 297-324.

PETTERSSON, E.A.K.; RAGNAR, M.; LINDSTRÖM, M.E. Kraft cooking characteristics and hexenuronic acid concentration of pulps from eucalypt and other hardwood species. **Nordic Pulp Paper Research Journal**, Stockholm, v. 17, n. 3, p. 222-227, 2002.

SACON, V.; MENOCELLI, S.; RATNIEKS, E. Misturas de polpas Brasileiras com o eucalipto. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 27., 1994, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: ABTCP, 1994. p. 463-473.

SANTOS, C.R. dos. **Qualidade da madeira e sua influência nas características de papéis imprimir & escrever e tissue.** 2002. 45 p. Monografia (Pós-Graduação Latu

Sensu em Tecnologia de Celulose e Papel) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

SANTOS, S.R.dos. **Influência da qualidade da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e do processo kraft de polpação na qualidade da polpa branqueada.** 2005. 160 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SCHILLING, A.C.; CSHNEIDER, P.R.; HASELEIN, C.; FINGER, C.A.G. Influência da desrama sobre a densidade da madeira de primeiro desbaste de *Pinus elliottii* Engelm. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 7 n. 1, p. 77-89, 1997.

SILVA, D.J.; OLIVEIRA, R.C.; COLODETTE, J.L.; GOMIDE, J.L. Impacto da qualidade da madeira na deslignificação, no branqueamento e na qualidade da polpa kraft de clones de eucalipto. **O Papel**, São Paulo, v. 58, n. 2, p. 33-43, fev. 1997.

SILVA JR., F.G.; BARRICHELO, L.E.G.; SHIMOYAMA, V.R.S.; WIECHETECK, M.S.S. Avaliação da qualidade da madeira de *Pinus patula* var. *tecunumanii* visando à produção de celulose kraft e pasta mecânica. **O Papel**, São Paulo, v. 55, n. 7, p. 32-35, jul. 1994.

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, jan. 2002.

TAPPI TEST METHODS. Atlanta. TAPPI PRESS. 2006.

TURNER, C.H.; BALODIS, V.; DEAN, G.H. Variability in pulping quality of *E. globulus* from Tasmanian provenances. **Appita**, Carlton, v. 36, n. 5, p. 371-376, 1983.

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, Jan. 1999.

VASCONCELOS, F.S.R. **Avaliação do processo SuperBatch TM de polpação de *Pinus taeda*.** 2005. 105 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A

### Densidade básica das árvores individuais por material genético

Árvores	Densidade básica (g/cm <sup>3</sup> )*		
	<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Pinus taeda</i>
1	0,523	0,491	0,343
2	0,499	0,502	0,359
3	0,467	0,535	0,312
4	0,507	0,512	0,342
5	0,503	0,488	0,327
6	0,478	0,518	0,313
7	0,474	0,494	0,324
8	0,462	0,498	0,355
9	0,453	0,524	0,321
10	0,467	0,489	0,329
Média	0,483	0,505	0,333
Desvio padrão	0,022	0,016	0,016
CV (%)	4,63	3,15	4,85

\*Valores médios de três repetições por árvore

Árvores hachuradas de cinza não fazem parte da amostra composta utilizada para o estudo.

**APÊNDICE B**

Análise de variância e teste F para densidade básica, teor de lignina total, teor de extrativos totais e teor de holocelulose dos materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*.

GL= grau de liberdade SQ= soma de quadrados QM= quadrado médio P= probabilidade

Análise de variância e teste F para o parâmetro densidade básica da madeira.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	0,0561500	0,0280750	5615,00	<0,005
Resíduo	6	0,0000300	0,0000050		
Total	8	0,0561800			

Análise de variância e teste F para o parâmetro teor de lignina total da madeira.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	10,6588	5,3294	169,97	<0,005
Resíduo	6	0,1881	0,0314		
Total	8	10,8470			

Análise de variância e teste F para o parâmetro teor de extrativos totais da madeira.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	2,1049	1,0524	25,31	0,001
Resíduo	6	0,2495	0,0416		
Total	8	2,3544			

Análise de variância e teste F para o parâmetro teor holocelulose da madeira.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	10,5217	5,2608	122,19	<0,005
Resíduo	6	0,2583	0,0431		
Total	8	10,7800			

**APÊNDICE C**

Análise de variância e teste F para resultados de polpação individuais do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*.

GL= grau de liberdade SQ= soma de quadrados QM= quadrado médio P= probabilidade

Análise de variância e teste F para álcali efetivo aplicado.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	49,61333	24,80667	*	<0,005
Resíduo	3	0,00000	0,00000		
Total	5	49,61333			

Análise de variância e teste F para fator H.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	1280533	640267	*	<0,005
Resíduo	3	0	0		
Total	5	1280533			

Análise de variância e teste F para número kappa das polpas celulósicas.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	86,644	43,322	104,79	0,002
Resíduo	3	1,240	0,413		
Total	5	87,884			

Análise de variância e teste F para rendimento bruto das polpas celulósicas.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	139,912	69,956	374,30	<0,005
Resíduo	3	0,561	0,187		
Total	5	140,472			

Análise de variância e teste F para teor de rejeito das polpas celulósicas.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	0,005516	0,002758	4,39	0,128
Resíduo	3	0,001885	0,000628		
Total	5	0,007401			

Análise de variância e teste F para rendimento depurado das polpas celulósicas.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	138,983	69,491	375,76	<0,005
Resíduo	3	0,555	0,185		
Total	5	139,537			

Análise de variância e teste F para viscosidade das polpas celulósicas.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	5162,4	2581,2	92,03	0,002
Resíduo	3	84,1	28,0		
Total	5	5246,6			

Análise de variância e teste F para teor de sólidos gerados por tonelada de celulose.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	0,549733	0,274867	412,30	<0,005
Resíduo	3	0,002000	0,000667		
Total	5	0,551733			

Análise de variância e teste F para consumo específico de madeira.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	13,90750	6,95375	1568,52	<0,005
Resíduo	3	0,01330	0,00443		
Total	5	13,92080			



## APÊNDICE D

Análise de variância para resultados de polpação das misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*.

GL= grau de liberdade    SQ= soma de quadrados    QM= quadrado médio    P= probabilidade

Análise de variância para álcali efetivo aplicado.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	25,7386	1	25,7386	230,20	<0,005
Resíduo	1,11809	10	0,111809		
Total (Corr.)	26,8567	11			

Análise de variância para fator H.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	1,03722E6	1	1,03722E6	983,01	<0,005
Resíduo	10551,4	10	1055,14		
Total (Corr.)	1,04777E6	11			

Análise de variância para número kappa das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	0,000141406	1	0,000141406	224,09	<0,005
Resíduo	0,0000063102	10	6,3102E-7		
Total (Corr.)	0,000147716	11			

Análise de variância para rendimento bruto das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	64,3524	1	64,3524	1125,09	<0,005
Resíduo	0,571976	10	0,0571976		
Total (Corr.)	64,9244	11			

Análise de variância para teor de rejeitos das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	467,94	1	467,94	0,32	0,5857
Resíduo	14751,6	10	1475,16		
Total (Corr.)	15219,6	11			

Análise de variância para rendimento depurado das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	64,2739	1	64,2739	1083,47	<0,005
Resíduo	0,59322	10	0,059322		
Total (Corr.)	64,8671	11			

Análise de variância para viscosidade das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	205162,0	1	205162,0	89,01	<0,005
Resíduo	23049,4	10	2304,94		
Total (Corr.)	228211,0	11			

Análise de variância para teor de sólidos gerados por tonelada de celulose.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	0,211818	1	0,211818	1145,71	<0,005
Resíduo	0,00184879	10	0,000184879		
Total (Corr.)	0,213667	11			

Análise de variância para consumo específico de madeira.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	2,61945	1	2,61945	2104,78	<0,005
Resíduo	0,0124452	10	0,00124452		
Total (Corr.)	2,63189	11			

## APÊNDICE E

Análise de variância para resultados de polpação das misturas entre os materiais *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*.

GL= grau de liberdade SQ= soma de quadrados QM= quadrado médio P= probabilidade

Análise de variância para álcali efetivo aplicado.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	16,1703	1	16,1703	174,56	<0,005
Resíduo	0,926325	10	0,0926325		
Total (Corr.)	17,0967	11			

Análise de variância para fator H.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	1,03722E6	1	1,03722E6	983,01	<0,005
Resíduo	10551,4	10	1055,14		
Total (Corr.)	1,04777E6	11			

Análise de variância para número kappa das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	37,3894	1	37,3894	307,01	<0,005
Resíduo	1,21785	10	0,121785		
Total (Corr.)	38,6073	11			

Análise de variância para rendimento bruto das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	28,3335	1	28,3335	268,88	<0,005
Resíduo	1,05376	10	0,105376		
Total (Corr.)	29,3873	11			

Análise de variância para teor de rejeitos das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	0,00280381	1	0,00280381	9,28	0,0123
Resíduo	0,00302119	10	0,000302119		
Total (Corr.)	0,005825	11			

Análise de variância para rendimento depurado das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	31,2664	1	31,2664	339,01	<0,005
Resíduo	0,922282	10	0,0922282		
Total (Corr.)	32,1887	11			

Análise de variância para viscosidade das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	135741,0	1	135741,0	54,47	<0,005
Resíduo	24919,3	10	2491,93		
Total (Corr.)	160661,0	11			

Análise de variância para teor de sólidos gerados por tonelada de celulose.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	0,112748	1	0,112748	577,73	<0,005
Resíduo	0,00195158	10	0,000195158		
Total (Corr.)	0,1147	11			

Análise de variância para consumo específico de madeira.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	2,14026	1	2,14026	2012,69	<0,005
Resíduo	0,0106338	10	0,00106338		
Total (Corr.)	2,15089	11			

## APÊNDICE F

Análise de variância para resultados de polpação das misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus globulus*, nas proporções de 10 a 50% de *Eucalyptus globulus*.

GL= grau de liberdade SQ= soma de quadrados QM= quadrado médio P= probabilidade

Análise de variância para álcali efetivo aplicado.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	0,286895	1	0,286895	293,58	<0,005
Resíduo	0,00977216	10	0,000977216		
Total (Corr.)	0,296667	11			

Análise de variância para número kappa das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	0,0244464	1	0,0244464	0,18	0,6796
Resíduo	1,35118	10	0,135118		
Total (Corr.)	1,37562	11			

Análise de variância para rendimento bruto das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	0,988798	1	0,988798	6,25	0,0314
Resíduo	1,58147	10	0,158147		
Total (Corr.)	2,57027	11			

Análise de variância para teor de rejeitos das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	0,000699779	1	0,000699779	21,97	0,0009
Resíduo	0,000318471	10	0,0000318471		
Total (Corr.)	0,00101825	11			

Análise de variância para rendimento depurado das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	1,03155	1	1,03155	6,61	0,0278
Resíduo	1,55975	10	0,155975		
Total (Corr.)	2,59129	11			

Análise de variância para viscosidade das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	2,92259E-9	1	2,92259E-9	22,83	0,0007
Resíduo	1,28028E-9	10	1,28028E-10		
Total (Corr.)	4,20287E-9	11			

---

 Análise de variância para teor de sólidos gerados por tonelada de celulose.
 

---

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	0,00236788	1	0,00236788	9,48	0,0117
Resíduo	0,00249879	10	0,000249879		
Total (Corr.)	0,00486667	11			

---



---

 Análise de variância para consumo específico de madeira.
 

---

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	0,00882038	1	0,00882038	14,06	0,0038
Resíduo	0,00627129	10	0,000627129		
Total (Corr.)	0,0150917	11			

---

## APÊNDICE G

Análise de variância e teste F para resultados de lignina solúvel, insolúvel e total, ácidos hexenurônicos e solubilidade em NaOH 5% (S5) nas polpas celulósicas obtidas a partir dos cozimentos individuais das espécies: *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*.

GL= grau de liberdade    SQ= soma de quadrados    QM= quadrado médio    P= probabilidade

Análise de variância e teste F para teor de lignina solúvel na polpa.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	1,01345	0,50673	125,38	<0,005
Resíduo	9	0,03638	0,00404		
Total	11	1,04983			

Análise de variância e teste F para teor de lignina insolúvel na polpa.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	4,6182	2,3091	166,96	<0,005
Resíduo	9	0,1245	0,0138		
Total	11	4,7427			

Análise de variância e teste F para teor de lignina total na polpa.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	1,7273	0,8636	70,09	<0,005
Resíduo	9	0,1109	0,0123		
Total	11	1,8382			

Análise de variância e teste F para teor de ácidos hexenurônicos na polpa.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	1077,91	538,96	326,14	<0,005
Resíduo	9	14,87	1,65		
Total	11	1092,79			

Análise de variância e teste F para solubilidade em NaOH 5% (S5) na polpa.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	79,1312	39,5656	2087,90	<0,005
Resíduo	3	0,0569	0,0190		
Total	5	79,1881			

## APÊNDICE H

Análise de variância para resultados de lignina solúvel, insolúvel e total, ácidos hexenurônicos e solubilidade em NaOH 5% (S5) nas polpas celulósicas obtidas a partir das misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*.

GL= grau de liberdade    SQ= soma de quadrados    QM= quadrado médio    P= probabilidade

Análise de variância para teor de lignina solúvel na polpa.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	0,39888	1	0,39888	65,51	<0,005
Resíduo	0,13395	22	0,00608862		
Total (Corr.)	0,53283	23			

Análise de variância para teor de lignina insolúvel na polpa.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	3,54825	1	3,54825	14,76	0,0009
Resíduo	5,28813	22	0,24037		
Total (Corr.)	8,83638	23			

Análise de variância para teor de lignina total na polpa.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	1,82414	1	1,82414	6,43	0,0188
Resíduo	6,23979	22	0,283627		
Total (Corr.)	8,06393	23			

Análise de variância para teor de ácidos hexenurônicos na polpa.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	565,206	1	565,206	28,64	<0,005
Resíduo	552,622	28	19,7365		
Total (Corr.)	1117,83	29			

Análise de variância para solubilidade em NaOH 5% (S5) na polpa.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	0,000818655	1	0,000818655	94,61	<0,005
Resíduo	0,0000865251	10	0,0000865251		
Total (Corr.)	0,00090518	11			



## APÊNDICE I

Análise de variância para resultados de lignina solúvel, insolúvel e total, ácidos hexenurônicos e solubilidade em NaOH 5% (S5) nas polpas celulósicas obtidas a partir das misturas entre os materiais *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*.

GL= grau de liberdade    SQ= soma de quadrados    QM= quadrado médio    P= probabilidade

Análise de variância para teor de lignina solúvel na polpa.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	0,523375	1	0,523375	67,05	<0,005
Resíduo	0,171731	22	0,00780593		
Total (Corr.)	0,695105	23			

Análise de variância para teor de lignina insolúvel na polpa.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	3,49282	1	3,49282	20,11	0,0002
Resíduo	3,82087	22	0,173676		
Total (Corr.)	7,3137	23			

Análise de variância para teor de lignina total na polpa.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	1,31187	1	1,31187	10,34	0,0040
Resíduo	2,79173	22	0,126897		
Total (Corr.)	4,1036	23			

Análise de variância para teor de ácidos hexenurônicos na polpa.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	0,209922	1	0,209922	43,07	<0,005
Resíduo	0,155973	32	0,00487416		
Total (Corr.)	0,365895	33			

Análise de variância para solubilidade em NaOH 5% (S5) na polpa.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	36,8049	1	36,8049	312,91	<0,005
Resíduo	1,17623	10	0,117623		
Total (Corr.)	37,9812	11			

## APÊNDICE J

Análise de variância para resultados de lignina solúvel, insolúvel e total, ácidos hexenurônicos e solubilidade em NaOH 5% (S5) nas polpas celulósicas obtidas a partir das misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus globulus*, nas proporções de 10 a 50% de *Eucalyptus globulus*.

GL= grau de liberdade SQ= soma de quadrados QM= quadrado médio P= probabilidade

Análise de variância para teor de lignina solúvel na polpa.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	0,183962	1	0,183962	3,11	0,0918
Resíduo	1,30214	22	0,0591881		
Total (Corr.)	1,4861	23			

Análise de variância para teor de lignina insolúvel na polpa.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	0,0321301	1	0,0321301	3,11	0,0916
Resíduo	0,227213	22	0,0103278		
Total (Corr.)	0,259343	23			

Análise de variância para teor de lignina total na polpa.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	0,150154	1	0,150154	1,11	0,3044
Resíduo	2,98694	22	0,13577		
Total (Corr.)	3,1371	23			

Análise de variância para teor de ácidos hexenurônicos na polpa.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	0,0000115362	1	0,0000115362	24,87	<0,005
Resíduo	0,0000129867	28	4,63812E-7		
Total (Corr.)	0,0000245229	29			

Análise de variância para solubilidade em NaOH 5% (S5) na polpa.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	0,0963354	1	0,0963354	115,92	<0,005
Resíduo	0,0083108	10	0,00083108		
Total (Corr.)	0,104646	11			

## APÊNDICE K

Análise de variância e teste F para resultados de comprimento e largura das fibras, teor de finos, coarseness e número de fibras/grama das polpas celulósicas obtidas a partir dos cozimentos individuais das espécies: *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*.

GL= grau de liberdade    SQ= soma de quadrados    QM= quadrado médio    P= probabilidade

Análise de variância e teste F para comprimento de fibra nas polpas celulósicas.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	3,916089	1,958045	64198,19	<0,005
Resíduo	9	0,000275	0,000031		
Total	11	3,916364			

Análise de variância e teste F para largura de fibra nas polpas celulósicas.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	626,852	313,426	2885,76	<0,005
Resíduo	9	0,978	0,109		
Total	11	627,829			

Análise de variância e teste F para teor de finos nas polpas celulósicas.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	0,7195	0,3597	11,44	0,003
Resíduo	9	0,2830	0,0314		
Total	11	1,0025			

Análise de variância e teste F para coarseness nas polpas celulósicas.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	0,0242662	0,0121331	2335,78	<0,005
Resíduo	9	0,0000468	0,0000052		
Total	11	0,0243129			

Análise de variância e teste F para número de fibras/grama nas polpas celulósicas.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	2038,54	1019,27	678,13	<0,005
Resíduo	9	13,53	1,50		
Total	11	2052,07			

## APÊNDICE L

Análise de variância para resultados de comprimento e largura das fibras, teor de finos, coarseness e número de fibras/grama das polpas celulósicas obtidas a partir das misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*.

GL= grau de liberdade    SQ= soma de quadrados    QM= quadrado médio    P= probabilidade

Análise de variância para comprimento de fibra nas polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	0,2935	1	0,2935	1330,99	<0,005
Resíduo	0,00485129	22	0,000220513		
Total (Corr.)	0,298352	23			

Análise de variância para largura de fibra nas polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	3,86575	1	3,86575	16,26	0,0006
Resíduo	5,2305	22	0,23775		
Total (Corr.)	9,09625	23			

Análise de variância para teor de finos nas polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	0,0225004	1	0,0225004	0,64	0,4327
Resíduo	0,774895	22	0,0352225		
Total (Corr.)	0,797396	23			

Análise de variância para coarseness nas polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	47,5127	1	47,5127	177,52	<0,005
Resíduo	5,88815	22	0,267643		
Total (Corr.)	53,4008	23			

Análise de variância para número de fibras/grama nas polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	173,486	1	173,486	296,93	<0,005
Resíduo	12,8537	22	0,58426		
Total (Corr.)	186,34	23			

## APÊNDICE M

Análise de variância para resultados de comprimento e largura das fibras, teor de finos, coarseness e número de fibras/grama das polpas celulósicas obtidas a partir das misturas entre os materiais *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*.

GL= grau de liberdade    SQ= soma de quadrados    QM= quadrado médio    P= probabilidade

Análise de variância para comprimento de fibra nas polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	0,433554	1	0,433554	1339,22	<0,005
Resíduo	0,00712218	22	0,000323735		
Total (Corr.)	0,440676	23			

Análise de variância para largura de fibra nas polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	0,000104522	1	0,000104522	147,70	<0,005
Resíduo	0,000015568	22	7,07665E-7		
Total (Corr.)	0,000120091	23			

Análise de variância para teor de finos nas polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	0,00263226	1	0,00263226	8,14	0,0093
Resíduo	0,00711849	22	0,000323568		
Total (Corr.)	0,00975075	23			

Análise de variância para coarseness nas polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	155,542	1	155,542	334,15	<0,005
Resíduo	10,2407	22	0,465488		
Total (Corr.)	165,783	23			

Análise de variância para número de fibras/grama nas polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	643,572	1	643,572	428,31	<0,005
Resíduo	33,0573	22	1,5026		
Total (Corr.)	676,63	23			

## APÊNDICE N

Análise de variância para resultados de comprimento e largura das fibras, teor de finos, coarseness e número de fibras/grama das polpas celulósicas obtidas a partir das misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus globulus*, nas proporções de 10 a 50% de *Eucalyptus globulus*.

GL= grau de liberdade    SQ= soma de quadrados    QM= quadrado médio    P= probabilidade

Análise de variância para comprimento de fibra nas polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	0,0108253	1	0,0108253	204,89	<0,005
Residual	0,00116234	22	0,0000528334		
Total (Corr.)	0,0119876	23			

Análise de variância para largura de fibra nas polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	0,000055469	1	0,000055469	94,00	<0,005
Resíduo	0,0000129823	22	5,90103E-7		
Total (Corr.)	0,0000684513	23			

Análise de variância para teor de finos nas polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	0,0816014	1	0,0816014	1,48	0,2372
Resíduo	1,2158	22	0,0552636		
Total (Corr.)	1,2974	23			

Análise de variância para coarseness nas polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	0,000188427	1	0,000188427	67,32	<0,005
Resíduo	0,000061573	22	0,00000279877		
Total (Corr.)	0,00025	23			

Análise de variância para número de fibras/grama nas polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% % <i>E. globulus</i>	0,877821	1	0,877821	105,64	<0,005
Resíduo	0,182817	22	0,00830988		
Total (Corr.)	1,06064	23			

## APÊNDICE O

Análise de variância e teste F para resultados das análises de testes-físicos das polpas celulósicas obtidas a partir dos cozimentos individuais das espécies: *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda*.

GL= grau de liberdade    SQ= soma de quadrados    QM= quadrado médio    P= probabilidade

Análise de variância e teste F para drenabilidade das polpas celulósicas.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	415,50	207,75	31,42	<0,005
Resíduo	9	59,50	6,61		
Total	11	475,00			

Análise de variância e teste F para alongamento das polpas celulósicas.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	1,4185	0,7093	33,17	0,009
Resíduo	3	0,0642	0,0214		
Total	5	1,4827			

Análise de variância e teste F para índice de tração das polpas celulósicas.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	366,15	183,08	24,34	0,014
Resíduo	3	22,56	7,52		
Total	5	388,72			

Análise de variância e teste F para índice de rasgo das polpas celulósicas.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	63,5350	31,7675	351,54	<0,005
Resíduo	3	0,2711	0,0904		
Total	5	63,8061			

Análise de variância e teste F para índice de estouro das polpas celulósicas.

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Espécie	2	1,1080	0,5540	12,29	0,036
Resíduo	3	0,1353	0,0451		
Total	5	1,2433			

## APÊNDICE P

Análise de variância e teste F para resultados das análises testes-físicos das polpas celulósicas obtidas a partir das misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*.

GL= grau de liberdade    SQ= soma de quadrados    QM= quadrado médio    P= probabilidade

Análise de variância para drenabilidade das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	66,7412	1	66,7412	22,33	0,0001
Resíduo	65,7588	22	2,98904		
Total (Corr.)	132,5	23			

Análise de variância para alongamento das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	0,0408007	1	0,0408007	4,07	0,0713
Resíduo	0,100224	10	0,0100224		
Total (Corr.)	0,141025	11			

Análise de variância para índice de tração das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	266,478	1	266,478	29,85	0,0003
Resíduo	89,2783	10	8,92783		
Total (Corr.)	355,756	11			

Análise de variância para índice de rasgo das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	0,00484966	1	0,00484966	77,39	<0,005
Resíduo	0,000626647	10	0,0000626647		
Total (Corr.)	0,00547631	11			

Análise de variância para índice de estouro das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	0,345148	1	0,345148	4,54	0,0590
Resíduo	0,760877	10	0,0760877		
Total (Corr.)	1,10602	11			



## APÊNDICE Q

Análise de variância e teste F para resultados das análises testes-físicos das polpas celulósicas obtidas a partir das misturas entre os materiais *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* nas proporções de 10 a 50% de *Pinus taeda*.

GL= grau de liberdade    SQ= soma de quadrados    QM= quadrado médio    P= probabilidade

Análise de variância para drenabilidade das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	117,873	1	117,873	10,85	0,0033
Resíduo	239,085	22	10,8675		
Total (Corr.)	356,958	23			

Análise de variância para alongamento das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	0,000110895	1	0,000110895	0,30	0,5931
Resíduo	0,00363915	10	0,000363915		
Total (Corr.)	0,00375005	11			

Análise de variância para índice de tração das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	270,537	1	270,537	24,44	0,0006
Resíduo	110,678	10	11,0678		
Total (Corr.)	381,215	11			

Análise de variância para índice de rasgo das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	29,4036	1	29,4036	419,78	<0,005
Resíduo	0,700455	10	0,0700455		
Total (Corr.)	30,1041	11			

Análise de variância para índice de estouro das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>Pinus taeda</i>	0,317878	1	0,317878	4,60	0,0576
Resíduo	0,691013	10	0,0691013		
Total (Corr.)	1,00889	11			

## APÊNDICE R

Análise de variância e teste F para resultados das análises testes-físicos das polpas celulósicas obtidas a partir das misturas entre os materiais *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus globulus*, nas proporções de 10 a 50% de *Eucalyptus globulus*.

GL= grau de liberdade    SQ= soma de quadrados    QM= quadrado médio    P= probabilidade

Análise de variância para drenabilidade das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	20,6286	1	20,6286	1,39	0,2506
Resíduo	325,871	22	14,8123		
Total (Corr.)	346,5	23			

Análise de variância para alongamento das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	0,019515	1	0,019515	13,90	0,0039
Resíduo	0,0140347	10	0,00140347		
Total (Corr.)	0,0335497	11			

Análise de variância para índice de tração das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	57,5362	1	57,5362	4,28	0,0655
Resíduo	134,549	10	13,4549		
Total (Corr.)	192,085	11			

Análise de variância para índice de rasgo das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	0,00000658	1	0,00000658023	0,06	0,8138
Resíduo	0,00112559	10	0,000112559		
Total (Corr.)	0,00113217	11			

Análise de variância para índice de estouro das polpas celulósicas.

Fonte	SQ	GL	QM	F	P
% <i>E. globulus</i>	0,00544464	1	0,00544464	9,43	0,0118
Resíduo	0,00577301	10	0,000577301		
Total (Corr.)	0,0112177	11			