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

Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando à produção de celulose kraft branqueada

Tiago Edson Simkunas Segura

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Tecnologia de Produtos Florestais

**Piracicaba
2015**

Tiago Edson Simkunas Segura
Engenheiro Florestal

**Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos
visando à produção de celulose kraft branqueada**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutor em Ciências, Programa: Recursos
Florestais. Opção em: Tecnologia de Produtos
Florestais

Piracicaba
2015

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Segura, Tiago Edson Simkunas

Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando à produção de celulose kraft branqueada / Tiago Edson Simkunas Segura . - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2015. 198 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Densidade básica 2. Folhosas 3. Caracterização tecnológica 4. Polpação kraft I. Título

CDD 676.126
S456a

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

DEDICO

À minha esposa Juliana, pelo amor e apoio em todos os momentos

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Juliana pelo amor, apoio e compreensão em todos esses anos.

À minha família, em especial aos meus pais Edson e Helena, que sempre apoiaram meus estudos.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, principalmente ao Departamento de Ciências Florestais e todos seus professores e funcionários por terem me acolhido desde a graduação.

Ao Professor Francides Gomes da Silva Junior pela amizade, orientação e confiança depositada durante todos esses anos.

Ao Engenheiro José Carlos Kling, um dos maiores incentivadores deste trabalho, pela confiança depositada em mim e no LQCE.

Ao Engenheiro Carlos Monteiro pelo apoio e confiança.

À Eldorado Brasil Celulose pelo apoio desde o início do trabalho, pelas amostras de *E. grandis* x *E. urophylla* e *C. citriodora* e pela oportunidade.

À CAPES pelo apoio financeiro no início deste trabalho.

À Aperam, em nome de Eduardo P. Henriques, João B. S. Neto e Nivaldo S. Martins, pelas amostras de madeira dos híbridos de *C. citriodora* e *C. torelliana*.

À Preservar Madeira Reflorestada, principalmente ao Eugenio Paceli, pelo fornecimento da madeira de *C. torelliana*.

Aos amigos de laboratório e pós-graduação Magnos Vivian e Camila Sarto pela amizade, boas risadas e diversas discussões sobre este e muitos outros trabalhos.

À Engenheira Marina Salve pelo enorme apoio nos cozimentos e branqueamentos deste projeto.

À Engenheira Marina Zanão pelo auxílio nas análises de morfologia das fibras.

Ao Laboratório de Anatomia da Madeira do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ pelas análises de morfologia das fibras.

À Maria Regina Buch, Isabela Pitton, Aline Reis e Matheus Gonçalves pelo auxílio em diversas análises durante o projeto.

À toda equipe do LQCE, em Piracicaba, em especial: Eraldo, Flávia, Laura, José Martins e Ana Júlia pela convivência.

À equipe do laboratório da Eldorado, em especial Leonardo Pimenta, Juarez Nogueira, Fabio Silva, Francine Axelson, Janaína Cruz e Alcyele Assunção pelo apoio nos branqueamentos e testes físicos.

Aos meus colegas de trabalho na Eldorado, em especial Villarroel, Tonelli, Marlos, Mauricio, Paulo, Pasquale, Gilson, Hélio, Luciano e Cinthia pela convivência nestes dois últimos anos.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	17
LISTA DE UNIDADES	23
1 INTRODUÇÃO	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 O gênero <i>Corymbia</i>	27
2.2 Densidade básica da madeira.....	31
2.3 Polpação kraft	36
3 MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1 Material.....	41
3.2 Amostragem.....	45
3.3 Picagem.....	45
3.4 Classificação granulométrica dos cavacos.....	46
3.5 Caracterização da madeira	46
3.5.1 Densidade básica dos discos.....	46
3.5.2 Densidade básica dos cavacos	49
3.5.3 Densidade aparente de cavacos	50
3.5.4 Composição química	50
3.5.5 Morfologia das fibras	51
3.6 Cozimentos	52
3.6.1 Análises da polpa.....	53
3.6.2 Análises do licor	55
3.7 Deslignificação com oxigênio	56
3.8 Branqueamentos.....	57
3.9 Morfologia das fibras das polpas branqueadas	59
3.10 Refino e testes físico-mecânicos das polpas branqueadas	60
3.11 Dimensionamento de uma fábrica de celulose.....	61
3.12 Análise de dados	67
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.1 Caracterização da madeira	69

4.1.1	Densidade básica dos discos	69
4.1.2	Densidade básica dos cavacos.....	83
4.1.3	Densidade aparente de cavacos.....	85
4.1.4	Composição química.....	87
4.1.5	Morfologia das fibras	92
4.2	Cozimentos.....	94
4.2.1	Análises da polpa	96
4.2.2	Análises do licor.....	105
4.3	Deslignificação com oxigênio	109
4.4	Branqueamentos	115
4.5	Morfologia das fibras das polpas branqueadas.....	120
4.6	Refino e testes físico-mecânicos das polpas branqueadas.....	124
4.7	Dimensionamento de uma fábrica de celulose	136
5	CONCLUSÕES	145
6	RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	147
	REFERÊNCIAS	149
	GLOSSÁRIO	161
	APÊNDICES.....	165

RESUMO

Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando à produção de celulose kraft branqueada

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a utilização das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos para a produção de celulose kraft branqueada. Para isso, as madeiras destas espécies e híbridos foram caracterizadas tecnologicamente e submetidas ao processo kraft de polpação e branqueamento, sendo comparadas à madeira de *E. grandis* x *E. urophylla*, utilizada como referência tecnológica. Ao todo, foram avaliadas sete diferentes materiais genéticos do gênero *Corymbia*: dois materiais de *C. citriodora*, com 8 e 18 anos de idade, um material de *C. torelliana*, com 15 anos, e quatro híbridos destas espécies, com 7 anos de idade. A madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* apresentava 6 anos de idade. Inicialmente, as madeiras das diferentes espécies e híbridos foram caracterizadas sendo, em seguida, submetidas a um processo modificado de polpação kraft. As polpas foram deslignificadas com oxigênio e branqueadas através da sequência DA Ep D₁ P visando alvura final de $89,5 \pm 0,5\%$ ISO, e tiveram suas características físico-mecânicas determinadas. O impacto das diferentes madeiras no dimensionamento de uma fábrica de celulose também foi avaliado. Os resultados mostram que as madeiras do gênero *Corymbia* apresentam alta densidade básica e baixo teor de lignina, além de fibras com maior comprimento, menor largura, menor diâmetro do lume, maior espessura de parede e maior fração parede em relação à madeira de *E. grandis* x *E. urophylla*. Os processos de polpação de *C. citriodora* (madeira de 8 anos) e *E. grandis* x *E. urophylla* demandam menor carga alcalina e fator H, resultando nos maiores rendimentos, sendo que os menores consumos específicos de madeira foram observados para as madeiras de *C. citriodora*. A deslignificação com oxigênio é mais eficiente para as polpas do gênero *Corymbia* em comparação à polpa de *E. grandis* x *E. urophylla*. No branqueamento, as polpas *C. citriodora* (madeira de 8 anos) e *E. grandis* x *E. urophylla* são as que demandam menor aplicação de reagentes químicos para atingir determinada alvura. Em comparação às polpas das demais espécies e híbridos avaliadas, as polpas branqueadas da espécie *C. citriodora* apresentam alto volume específico, baixa resistência à passagem do ar, alta capilaridade, baixo índice de retenção de água e alta resistência ao rasgo, características que recomendam a utilização da polpa desta espécie para a produção de papéis de alta absorção (*tissue*). Já as polpas de *C. torelliana* x *C. citriodora* apresentam baixo volume específico, alta resistência à passagem do ar e baixa capilaridade, enquanto as polpas de *E. grandis* x *E. urophylla* e de um dos materiais de *C. citriodora* x *C. torelliana* se destacam por apresentar as maiores resistências à tração, rasgo e estouro. No dimensionamento de uma fábrica de celulose, as madeiras dos híbridos de *C. citriodora* e *C. torelliana* que apresentam a espécie *C. torelliana* como genitor feminino (*C. torelliana* x *C. citriodora*) demandam maior atenção, principalmente nas áreas da caldeira de recuperação e caustificação, uma vez que apresentam alta demanda de álcali e alta geração de sólidos em comparação aos demais materiais genéticos.

Palavras-chave: Densidade básica; Folhosas; Caracterização tecnológica; Polpação kraft

ABSTRACT

Evaluation of the woods of *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* and their hybrids for bleached kraft pulp production

The present work aimed to evaluate the use of the woods of *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* and their hybrids on bleached kraft pulp production. Woods from these species and hybrids were technologically characterized and submitted to kraft pulping process and bleaching. These woods were compared to *E. grandis* x *E. urophylla*, which was used as technological reference. Seven different genetic materials from *Corymbia* were analyzed: two materials of *C. citriodora*, with 8 and 18 years-old, one material of *C. torelliana*, with 15 years-old, and four hybrids of these species, with 7 years-old. The wood of de *E. grandis* x *E. urophylla* had 6 years-old. Initially, the different woods were technologically characterized and then submitted to a modified kraft pulping process. The pulps were delignified with oxygen and bleached through a DA Ep D₁ P bleaching sequence until $89,5 \pm 0,5\%$ ISO of brightness. The bleached pulps had their physical-mechanical characteristics evaluated. The impact of these different woods in a pulp mill dimensioning was also evaluated. The results show that the woods of *Corymbia* genus present high basic density, low lignin content and fibers with higher length, lower width, lower lumen width, higher wall thickness and higher wall fraction if compared to *E. grandis* x *E. urophylla*. The pulping of *C. citriodora* and *E. grandis* x *E. urophylla* demands lower alkali charge and H factor, resulting in higher yields, while the lowest wood specific consumption was observed to *C. citriodora*'s woods. The oxygen delignification is more efficient for *Corymbia*'s pulps than for *E. grandis* x *E. urophylla*. On bleaching, the pulps of *C. citriodora* (wood with 8 years-old) and *E. grandis* x *E. urophylla* are those that demand the lowest chemical reagents charges to achieve the determined brightness. The bleached pulps of *C. citriodora* present high specific volume, low air passage resistance, high capillarity, low water retention value and high tear index. Based on these characteristics it is possible to recommend this species to tissue papers production. The pulps of *C. torelliana* x *C. citriodora* present low specific volume, high air passage resistance and low capillarity, while the pulp of *E. grandis* x *E. urophylla* and one of the hybrids of *C. citriodora* x *C. torelliana* stands out for presenting the higher tensile, tear and burst indexes. In a pulp mill dimensioning, the woods of *C. torelliana* x *C. citriodora* demands higher attention, mainly on recovery boiler and causticizing, for presenting high alkali demand and high solids generation in comparison to the other genetic materials.

Keywords: Basic density; Hardwood; Technological characterization; Kraft pulping

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação filogenética dos eucaliptos	27
Figura 2 – Diferenciação botânica dos gêneros <i>Eucalyptus</i> , <i>Corymbia</i> e <i>Angophora</i> . A e B: flores com opérculos, como ocorre em <i>Eucalyptus</i> e <i>Corymbia</i> ; C: flores sem opérculos, como ocorre em <i>Angophora</i>	28
Figura 3 – Ocorrência natural de <i>Corymbia citriodora</i> na Austrália	28
Figura 4 – Localização da espécie <i>Corymbia citriodora</i> ao redor do mundo	29
Figura 5 – Ocorrência natural de <i>Corymbia torelliana</i> na Austrália.....	29
Figura 6 – Localização da espécie <i>Corymbia torelliana</i> ao redor do mundo.....	30
Figura 7 – Esquema de uma fábrica de celulose kraft com máquina de papel integrada.....	39
Figura 8 – Desenvolvimento e nomenclatura dos diferentes processos de cozimento modificado contínuo	40
Figura 9 – Municípios de coleta	42
Figura 10 – Áreas de coleta. A: <i>C. citriodora</i> (Água Clara – MS); B: <i>C. torelliana</i> (Periquito – MG); C: <i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> – T x C 01 (Itamarandiba – MG); D: <i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> – T x C 02 (Itamarandiba – MG); E: <i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> – C x T 01 (Itamarandiba – MG); F: <i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> – C x T 02 (Itamarandiba – MG).....	44
Figura 11 – Esquema de amostragem, em que Hc: altura comercial	45
Figura 12 – Diâmetros medidos nos discos, em que: d s/c: diâmetro sem casca; d c/c: diâmetro com casca.....	46
Figura 13 – Cunhas utilizadas na determinação da densidade básica	47
Figura 14 – Representação esquemática das áreas de picagem de toras, peneiramento de cavacos, extração e alimentação do digestor	62
Figura 15 – Representação esquemática das áreas de evaporação, caldeira de recuperação e caustificação	63
Figura 16 – Variação longitudinal da densidade básica da madeira.....	72
Figura 17 – Índice de heterogeneidade.....	74
Figura 18 – Variação da densidade básica da casca no sentido base-topo	78
Figura 19 – Teor de casca em volume no sentido longitudinal	79
Figura 20 – Relação entre densidade básica de cavacos e densidade básica de discos.....	84
Figura 21 – Incremento médio anual mássico de madeira (sem casca).....	85
Figura 22 – Relação entre densidade aparente e densidade básica de cavacos	87

Figura 23 – Relação entre fração parede das fibras da madeira e densidade básica de cavacos	93
Figura 24 – Relação entre consumo específico de madeira, densidade básica e rendimento depurado dos cozimentos	99
Figura 25 – Número kappa corrigido	101
Figura 26 – Seletividade do processo de polpação	104
Figura 27 – Consumo de álcali	109
Figura 28 – Número kappa corrigido após a deslignificação com oxigênio.....	112
Figura 29 – Eficiência de deslignificação e da redução de kappa na deslignificação com oxigênio.....	113
Figura 30 – Consumo de Cloro Ativo Total Equivalente no processo de branqueamento	119
Figura 31 – Relação entre população fibrosa e <i>coarseness</i> das fibras das polpas branqueadas	122
Figura 32 – Relação entre fração parede e <i>coarseness</i> das fibras das polpas branqueadas ...	123
Figura 33 – Drenabilidade das polpas em função do número de revoluções.....	124
Figura 34 – Volume específico das polpas em função do número de revoluções	125
Figura 35 – Resistência à passagem do ar das polpas em função do número de revoluções.	126
Figura 36 – Opacidade das polpas em função do número de revoluções	127
Figura 37 – Relação entre opacidade das polpas sem refino e população fibrosa	127
Figura 38 – Capilaridade Klemm das polpas em função do número de revoluções	128
Figura 39 – Índice de Retenção de Água das polpas em função do número de revoluções ..	129
Figura 40 – Índice de tração das polpas em função do número de revoluções.....	130
Figura 41 – Índice de estouro das polpas em função do número de revoluções.....	131
Figura 42 – Índice de rasgo das polpas em função do número de revoluções	132
Figura 43 – Temperatura e pluviosidade média mensal de Selvíria – MS	167
Figura 44 – Temperatura e pluviosidade média mensal de Guarantã – SP.....	168
Figura 45 – Temperatura e pluviosidade média mensal de Água Clara – MS.....	169
Figura 46 – Temperatura e pluviosidade média mensal de Periquito – MG.....	170
Figura 47 – Temperatura e pluviosidade média mensal de Itamarandiba – MG	171
Figura 48 – Perfil de temperatura e fator H – <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> (URG)	187
Figura 49 – Perfil de temperatura e fator H – <i>C. citriodora</i> (CIT 01)	187
Figura 50 – Perfil de temperatura e fator H – <i>C. citriodora</i> (CIT 02)	188
Figura 51 – Perfil de temperatura e fator H – <i>C. torelliana</i> (TOR)	188
Figura 52 – Perfil de temperatura e fator H – <i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> – (T x C 01)	188

Figura 53 – Perfil de temperatura e fator H – <i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> (T x C 02).....	189
Figura 54 – Perfil de temperatura e fator H – <i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> (C x T 01).....	189
Figura 55 – Perfil de temperatura e fator H – <i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> (C x T 02).....	189
Figura 56 – Perfil de álcali ativo e sulfidez ao longo dos cozimentos. A: URG; B: CIT 01; C: CIT 02; D: TOR.....	194
Figura 57 – Perfil de álcali ativo e sulfidez ao longo dos cozimentos. A: T x C 01; B: T x C 02; C: C x T 01; D: C x T 02	195

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Densidade básica de diferentes madeiras de folhosas	34
Tabela 2 – Materiais genéticos utilizados.....	41
Tabela 3 – Caracterização dos materiais coletados e dos locais de coleta das amostras.....	43
Tabela 4 – Tempo, temperatura e distribuição da carga alcalina nas fases dos cozimentos	52
Tabela 5 – Parâmetros determinados nas polpas marrons	53
Tabela 6 – Parâmetros determinados nos licores coletados ao longo dos cozimentos.....	55
Tabela 7 - Condições da deslignificação com oxigênio	56
Tabela 8 - Condições dos estágios de branqueamento	58
Tabela 9 – Parâmetros determinados nas polpas branqueadas e refinadas.....	61
Tabela 10 – Eficiências operacionais das áreas avaliadas	62
Tabela 11 – Variação longitudinal da densidade básica da madeira	70
Tabela 12 – Ajuste de modelo matemático para variação da densidade básica da madeira no sentido longitudinal, em que x: posição na árvore em relação à altura comercial (%); y: densidade básica da madeira ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	71
Tabela 13 – Densidade básica ponderada da madeira	73
Tabela 14 – Densidade básica da casca nas diferentes posições em relação à altura comercial	76
Tabela 15 – Ajuste de modelo matemático para variação da densidade básica da casca no sentido longitudinal, em que x: posição na árvore em relação à altura comercial (%); y: densidade básica da casca.....	77
Tabela 16 – Densidade básica ponderada da casca	78
Tabela 17 – Teores de casca médios em volume e massa	80
Tabela 18 – Densidade básica ponderada total (madeira e casca).....	81
Tabela 19 – Proporção de casca e médias ponderadas de densidade básica total, densidade básica da madeira e densidade básica da casca	82
Tabela 20 – Densidade básica dos cavacos	83
Tabela 21 – Densidade aparente dos cavacos.....	86
Tabela 22 – Composição química da madeira.....	87
Tabela 23 – Teor de extrativos totais	88
Tabela 24 – Teor de lignina total – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)	89
Tabela 25 – Teor de cinzas – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)	91
Tabela 26 – Caracterização morfológica das fibras.....	92

Tabela 27 – Resultados dos cozimentos	95
Tabela 28 – Rendimento depurado – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)	98
Tabela 29 – Teor de ácidos hexenurônicos – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)	100
Tabela 30 – Alvura da polpa marrom – teste de comparação de médias (Teste de Tukey) ..	102
Tabela 31 – Viscosidade – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)	103
Tabela 32 – Incremento Médio Anual de Celulose proporcional ao do material de referência (URG).....	104
Tabela 33 – Sólidos gerados nos cozimentos – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)	106
Tabela 34 – Consumo de álcali ativo em cada fase de cozimento	107
Tabela 35 – Resultados da deslignificação com oxigênio	110
Tabela 36 – Número kappa – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)	111
Tabela 37 – Teor de ácidos hexenurônicos – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)	112
Tabela 38 – Alvura – teste de comparação de médias (Teste de Tukey).....	114
Tabela 39 – Viscosidade – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)	114
Tabela 40 – Características das polpas branqueadas e consumo de químicos no branqueamento	116
Tabela 41 – Viscosidade – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)	117
Tabela 42 – Características morfológicas das polpas branqueadas	121
Tabela 43 – Propriedades físico-mecânicas das polpas branqueadas sem refino	133
Tabela 44 – Propriedades físico-mecânicas das polpas branqueadas em função do índice de tração de $60 \text{ Nm} \cdot \text{g}^{-1}$	134
Tabela 45 – Dimensionamento da área de picagem de toras	136
Tabela 46 – Dimensionamento da área de peneiramento de cavacos	137
Tabela 47 – Dimensionamento das áreas de extração de cavacos e alimentação do digestor	137
Tabela 48 – Dimensionamento da área de evaporação	138
Tabela 49 – Dimensionamento da caldeira de recuperação	139
Tabela 50 – Dimensionamento da área de produção de licor branco - caustificação	140
Tabela 51 – Dimensionamento de uma fábrica de celulose com capacidade de produção de 1.500.000 toneladas de polpa celulósica branqueada	141
Tabela 52 – Área florestal total, proporcional ao material de referência e anual necessária para abastecer uma fábrica com produção de 1.500.000 toneladas de polpa celulósica	143

Tabela 53 – Análise de variância para densidade básica de discos - URG	176
Tabela 54 – Análise de variância para densidade básica de discos – CIT 01.....	176
Tabela 55 – Análise de variância para densidade básica de discos – CIT 02.....	176
Tabela 56 – Análise de variância para densidade básica de discos – TOR	176
Tabela 57 – Análise de variância para densidade básica de discos – T x C 01	177
Tabela 58 – Análise de variância para densidade básica de discos – T x C 02.....	177
Tabela 59 – Análise de variância para densidade básica de discos – C x T 01	177
Tabela 60 – Análise de variância para densidade básica de discos – C x T 02.....	177
Tabela 61 – Análise de variância para densidade básica da casca - URG.....	178
Tabela 62 – Análise de variância para densidade básica da casca – CIT 01	178
Tabela 63 – Análise de variância para densidade básica da casca – CIT 02.....	178
Tabela 64 – Análise de variância para densidade básica da casca – TOR	178
Tabela 65 – Análise de variância para densidade básica da casca – T x C 01	179
Tabela 66 – Análise de variância para densidade básica da casca – T x C 02	179
Tabela 67 – Análise de variância para densidade básica da casca – C x T 01	179
Tabela 68 – Análise de variância para densidade básica da casca – C x T 02	179
Tabela 69 – Análise de variância para densidade básica ponderada da madeira	180
Tabela 70 – Análise de variância para densidade básica ponderada da casca.....	180
Tabela 71 – Análise de variância para densidade básica total (madeira + casca)	180
Tabela 72 – Análise de variância para teor de casca em volume	180
Tabela 73 – Análise de variância para teor de casca em massa	181
Tabela 74 – Análise de variância para densidade básica dos cavacos.....	181
Tabela 75 – Análise de variância para densidade aparente dos cavacos	181
Tabela 76 – Análise de variância para teor de extrativos totais	181
Tabela 77 – Análise de variância para lignina total.....	182
Tabela 78 – Análise de variância para cinzas.....	182
Tabela 79 – Análise de variância para comprimento das fibras	182
Tabela 80 – Análise de variância para largura das fibras	182
Tabela 81 – Análise de variância para diâmetro do lume.....	183
Tabela 82 – Análise de variância para espessura de parede	183
Tabela 83 – Análise de variância para rendimento depurado.....	183
Tabela 84 – Análise de variância para ácidos hexenurônicos na polpa marrom.....	183
Tabela 85 – Análise de variância para alvura da polpa marrom	184
Tabela 86 – Análise de variância para viscosidade da polpa marrom.....	184

Tabela 87 – Análise de variância para sólidos gerados	184
Tabela 88 – Análise de variância para número kappa após deslignificação com oxigênio ...	184
Tabela 89 – Análise de variância para ácidos hexenurônicos após deslignificação	185
Tabela 90 – Análise de variância para alvura após deslignificação	185
Tabela 91 – Análise de variância para viscosidade após deslignificação	185
Tabela 92 – Análise de variância para viscosidade das polpas branqueadas	185
Tabela 93 – Análise de variância para reversão de alvura das polpas branqueadas	186
Tabela 94 – Caracterização dos licores de cozimento – <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> (URG)...	190
Tabela 95 – Caracterização dos licores de cozimento – <i>C. citriodora</i> (CIT 01)	190
Tabela 96 – Caracterização dos licores de cozimento – <i>C. citriodora</i> (CIT 02)	191
Tabela 97 – Caracterização dos licores de cozimento – <i>C. torelliana</i> (TOR)	191
Tabela 98 – Caracterização dos licores de cozimento – <i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> – (T x C 01)	192
Tabela 99 – Caracterização dos licores de cozimento – <i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> – (T x C 02)	192
Tabela 100 – Caracterização dos licores de cozimento – <i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> (C x T 01)	193
Tabela 101 – Caracterização dos licores de cozimento – <i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> (C x T 02)	193
Tabela 102 – Ajuste de modelo matemático para variação correlação entre índice de tração e número de revoluções. Modelo ajustado: $y = (a + b \cdot \ln x)^2$, em que x: índice de tração ($\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$); y: número de revoluções	196
Tabela 103 – Ajuste de modelo matemático para variação correlação entre índice de tração e drenabilidade. Modelo ajustado: $y = \frac{1}{a + b \cdot \sqrt{x}}$, em que x: índice de tração ($\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$); y: drenabilidade (°SR)	196
Tabela 104 – Ajuste de modelo matemático para variação correlação entre índice de tração e volume específico. Modelo ajustado: $y = \sqrt{a + b \cdot \sqrt{x}}$, em que x: índice de tração ($\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$); y: volume específico ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	196
Tabela 105 – Ajuste de modelo matemático para variação correlação entre índice de tração e resistência à passagem do ar. Modelo ajustado: $y = \exp(a + b \cdot x^2)$, em que x: índice de tração ($\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$); y: resistência à passagem do ar ($\text{s} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$)	197

Tabela 106 – Ajuste de modelo matemático para variação correlação entre índice de tração e opacidade. Modelo ajustado: $y = a + b \cdot x$, em que x: índice de tração ($\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$); y: opacidade (%)	197
Tabela 107 – Ajuste de modelo matemático para variação correlação entre índice de tração e capilaridade Klemm. Modelo ajustado: $y = a + b \cdot x$, em que x: índice de tração ($\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$); y: capilaridade Klemm ($\text{mm} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$)	197
Tabela 108 – Ajuste de modelo matemático para variação correlação entre índice de tração e índice de retenção de água. Modelo ajustado: $y = a + b \cdot x$, em que x: índice de tração ($\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$); y: índice de retenção de água (%)	198
Tabela 109 – Ajuste de modelo matemático para variação correlação entre índice de tração e índice de estouro. Modelo ajustado: $y = \sqrt{a + b \cdot x^2}$, em que x: índice de tração ($\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$); y: índice de estouro ($\text{kPam}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	198
Tabela 110 – Ajuste de modelo matemático para variação correlação entre índice de tração e índice de rasgo. Modelo ajustado: $y = \left(a + \frac{b}{x}\right)^2$, em que x: índice de tração ($\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$); y: índice de rasgo ($\text{mNm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	198

LISTA DE UNIDADES

% ISO: porcentagem ISO;
 %: porcentagem
 °C: grau Celsius;
 µm: micrometro;
 µmol·g⁻¹: micromol por grama;
 cm: centímetro;
 cm³·g⁻¹: centímetro por grama;
 g: grama;
 g·cm⁻³: grama por centímetro cúbico;
 g·L⁻¹: grama por litro;
 g·m⁻²: grama por metro quadrado;
 ha: hectare;
 kg·t⁻¹: quilograma por tonelada seca ao ar;
 kPa·m²·g⁻¹: kilopascal metro quadrado por grama;
 L·kg⁻¹: litro por quilograma;
 m: metro;
 m³·h⁻¹: metro cúbico por hora;
 m³·h⁻¹: metro cúbico *loose* por hora (densidade aparente de cavacos);
 m³·ha⁻¹·ano⁻¹: metro cúbico por hectare por ano;
 m³·t⁻¹: metro cúbico por tonelada;
 m³·t⁻¹: metro cúbico por tonelada seca ao ar;
 mg: miligrama;
 mg·100 m⁻¹: miligrama por 100 metros;
 mg·L⁻¹: miligrama por litro;
 mi fibras·g⁻¹: milhões de fibras por grama;
 min: minuto;
 mL: mililitro;
 mL·min⁻¹: mililitro por minuto;
 mm: milímetro;
 mm·10 min⁻¹: milímetro por 10 minutos;
 mNm²·g⁻¹: milinewton metro quadrado por grama;
 nm: nanômetro;

$\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$: milinewton por grama;

$^{\circ}\text{SR}$: grau Schopper-Riegler;

$\text{s} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$: segundo por 100 milímetros;

$\text{t} \cdot \text{dia}^{-1}$: tonelada por dia;

$\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$: tonelada por hectare por ano;

$\text{t} \cdot \text{tsa}^{-1}$: tonelada por tonelada seca ao ar;

$\text{tsa} \cdot \text{ano}^{-1}$: tonelada seca ao ar por ano;

$\text{tsa} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$: tonelada seca ao ar por hectare por ano;

1 INTRODUÇÃO

As florestas plantadas brasileiras atingiram, nos últimos anos, altos níveis de produtividade, com destaque para as florestas de *Eucalyptus*, que alcançam incrementos de madeira superiores a $35 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. A alta produtividade das florestas plantadas com *Eucalyptus* no Brasil se deve a diversos fatores, dentre os quais estão as condições edafoclimáticas do país, favoráveis ao crescimento de inúmeras espécies deste gênero, as avançadas técnicas de manejo silvicultural aplicadas e, principalmente, os programas de melhoramento genético, bastante desenvolvidos para este gênero.

Somadas às características tecnológicas de sua madeira, adequadas para diversas utilizações, essas vantagens silviculturais colaboraram para que o eucalipto conquistasse posição de destaque no cenário brasileiro de indústrias de base florestal. De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2015), a área plantada com espécies de eucalipto no Brasil era de 5,6 milhões de hectares em 2014, equivalente a 72% da área florestal plantada do país. Assim, a utilização de espécies de outros gêneros pela indústria brasileira encontra diversas resistências, apesar de alguns desses materiais genéticos apresentarem potencial tecnológico.

O gênero *Eucalyptus* está incluído na família *Myrtaceae* e possui mais de 700 espécies, a maioria delas nativas da Austrália. A partir dos anos 1970, alguns estudos apontaram que o gênero *Eucalyptus* não era um agrupamento taxonômico natural, apresentando duas diferentes linhagens, a primeira incluindo os até então subgêneros *Angophora* e *Corymbia*, e a outra compreendendo o subgênero *Eucalyptus*. Nos anos 1990, o gênero *Eucalyptus* foi reagrupado, fazendo com que os gêneros *Angophora* e *Corymbia* fossem criados. O gênero *Corymbia* possui 113 espécies, as quais possuem madeira com alta densidade básica, altos teores de extrativos e carboidratos, além de baixa proporção de lignina. Essas espécies apresentam importância comercial principalmente para a extração de óleos essenciais de suas folhas e utilização da madeira na construção civil, para a produção de carvão vegetal e geração de energia.

As espécies de *Corymbia* são consideradas de difícil propagação vegetativa, com baixos níveis de enraizamento e, por essa razão, seus plantios comerciais têm sido estabelecidos por via seminal. Apesar de algumas espécies serem resistentes a pragas florestais e ao stress hídrico, o melhoramento genético de *Corymbia* não tem sido muito explorado. Nos últimos anos, a hibridização entre diferentes espécies deste gênero, com o objetivo de transferir determinadas características das espécies envolvidas para o híbrido, vem sendo estudada.

Nesse contexto, a hibridização entre as espécies *Corymbia citriodora* e *Corymbia torelliana* começou a ser praticada, com a finalidade de agregar ao híbrido as características da madeira de *C. citriodora* e a resistência de *C. torelliana* a danos causados por ventos e pragas.

A maioria dos estudos sobre a madeira de *Corymbia* para a produção de polpa celulósica se concentrou entre os anos 1970 e 1990. Porém, apesar do potencial tecnológico demonstrado, a ausência de programas de melhoramento genético e a menor produtividade florestal em relação às espécies de *Eucalyptus* reduziram o interesse do setor de celulose e papel pelas espécies desse gênero.

Uma das principais características das madeiras de *Corymbia* é a alta densidade básica. Seu impacto na produção de celulose é direto, influenciando desde a preparação dos cavacos até a qualidade da celulose produzida. Estudos relatam que a alta densidade básica da madeira é prejudicial na produção de polpa celulósica, aumentando o desgaste dos picadores, dificultando a impregnação da madeira, aumentando o consumo alcalino e o teor de rejeitos e reduzindo o rendimento depurado do processo de polpação. Por outro lado, a alta densidade básica da madeira promove, no processo de produção de celulose, redução no consumo específico de madeira, o que pode significar diminuição dos custos de produção e da área plantada necessária para abastecer uma fábrica. A utilização de madeira com alta densidade básica para a produção de celulose é possível, desde que a área de picagem de toras e a impregnação de cavacos sejam projetadas para isso.

Além desses fatores, o surgimento dos cozimentos modificados, baseados numa melhor distribuição de energia e carga alcalina, colabora para a possível utilização de diferentes matérias-primas para a produção de polpa celulósica. Estudos relatam que os processos modificados de polpação são menos suscetíveis a variações na qualidade da madeira, sobretudo na densidade básica, em comparação aos processos convencionais.

Considerando o contexto apresentado, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar tecnologicamente as madeiras das espécies *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos e avaliar o desempenho destes materiais frente ao processo kraft de polpação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O gênero *Corymbia*

O gênero *Corymbia* pertence à família *Myrtaceae* e compreende 113 espécies que eram classificadas no gênero *Eucalyptus* até os anos 1990. Algumas das principais espécies deste gênero são:

- *C. citriodora*;
- *C. torelliana*;
- *C. maculata*;
- *C. calophylla*;
- *C. ficifolia*.

De acordo com Rozefelds (1996), estudos realizados a partir dos anos 1970 apontaram que o gênero até então conhecido como *Eucalyptus* não era um agrupamento taxonômico natural. Novas pesquisas indicaram a existência de duas linhagens principais. A primeira inclui os até então subgêneros *Angophora* e *Corymbia*, enquanto a outra compreende o subgênero *Eucalyptus*. Na Figura 1 é possível observar um diagrama das relações filogenéticas dos eucaliptos.

Figura 1 – Relação filogenética dos eucaliptos
Fonte: (ROZEFELDS, 1996)

Uma importante diferenciação botânica entre os novos gêneros *Eucalyptus*, *Corymbia* e *Angophora* é em relação às pétalas e sépalas de suas flores. Nas espécies do gênero *Eucalyptus*, elas são fundidas em um ou dois opérculos que cobrem os estames e o ovário, enquanto o gênero *Angophora* apresenta sépalas e pétalas livres. Em *Corymbia*, também existe a formação de opérculos, mas estes apresentam evolução independente do que é observado em *Eucalyptus* (ROZEFELDS, 1996), como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Diferenciação botânica dos gêneros *Eucalyptus*, *Corymbia* e *Angophora*. A e B: flores com opérculos, como ocorre em *Eucalyptus* e *Corymbia*; C: flores sem opérculos, como ocorre em *Angophora*

Fonte: (AUSTRALIAN NATIVE PLANTS SOCIETY - ANPSA, 2014; JOHNSTON, 2007; ASHE; HERBISON-EVANS, 2009)

Descrita por Hooker em 1846, a espécie *Eucalyptus citriodora* foi reclassificada no gênero *Corymbia* como *C. citriodora* por Hill e Johnson (1995). Esta espécie apresenta árvores com altura de 25 a 40 metros e folhas com aroma cítrico bastante característico. De acordo com Lorenzi et al. (2003), sua casca é lisa e decídua, branca, cinza ou rósea. Sua madeira é dura, de cor marrom, podendo ser utilizada na fabricação de móveis e construção civil. Esta espécie é amplamente cultivada para reflorestamentos e para a extração do óleo essencial de suas folhas.

C. citriodora é nativa de Queensland e New South Wales, na Austrália (Figura 3), e foi introduzida em diversas regiões do mundo (Figura 4).

Figura 3 – Ocorrência natural de *Corymbia citriodora* na Austrália

Fonte: (REIS et al., 2013)

Figura 4 – Localização da espécie *Corymbia citriodora* ao redor do mundo
 Fonte: (FORESTRY COMPENDIUM, 2014)

A espécie *Corymbia torelliana* foi inicialmente descrita em 1877 por Mueller, como *Eucalyptus torelliana* (FORESTRY COMPENDIUM, 2014). Hill e Johnson (1995) inseriram o *E. torelliana* no gênero *Corymbia*, como *C. torelliana*. As árvores desta espécie têm de 20 a 30 metros de altura, podendo atingir mais de 1 metro de diâmetro de tronco quando adultas, sendo encontradas em seu habitat natural nas margens e interior das florestas. A casca de suas árvores é caracterizada por apresentar coloração esverdeada (FORESTRY COMPENDIUM, 2014) e sua madeira é dura e forte, utilizada na construção civil (LORENZI et al., 2003). A espécie é resistente a danos causados por ventos e tem se mostrado promissora na hibridação com *C. citriodora*, havendo indícios de aumento de crescimento e resistência a pragas (REIS et al., 2014).

C. torelliana é nativa de Queensland, na Austrália, tendo sido introduzida em diversos países, conforme pode ser observado nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 – Ocorrência natural de *Corymbia torelliana* na Austrália
 Fonte: (REIS et al., 2014)

Figura 6 – Localização da espécie *Corymbia torelliana* ao redor do mundo

Fonte: (FORESTRY COMPENDIUM, 2014)

Em um estudo comparativo sobre o crescimento de espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*, Vilas Bôas, Max e Melo (2009) concluíram que a espécie *C. citriodora* é a que apresenta menor produção de madeira. Porém, por ser uma madeira valorizada pelas serrarias, carvoarias e usinas de tratamento de madeira, pode alcançar um melhor preço.

As espécies do gênero *Corymbia* são consideradas de difícil propagação. Com exceção do *C. torelliana*, onde o enraizamento é viável, as demais espécies apresentam baixos índices de enraizamento. Por esta razão, as plantações comerciais de *Corymbia* têm sido tradicionalmente estabelecidas por via seminal (REIS et al., 2013).

De acordo com Reis et al. (2014), a espécie *C. torelliana* possui a maior capacidade de enraizamento em relação a outras espécies pertencentes ao gênero *Corymbia*. Entretanto, há variabilidade para essa característica entre árvores e valores acima de 80% podem ser alcançados. De acordo com os mesmos autores, observa-se efeito materno no enraizamento de híbridos utilizando a espécie *C. torelliana*. Ao se utilizar esta espécie como genitor feminino, há maior quantidade de clones com níveis de enraizamento comerciais (ASSIS, 2000).

A densidade da madeira é uma característica herdada de forma aditiva, apresentando valores intermediários em relação às espécies genitoras. Os híbridos *C. torelliana* x *C. citriodora* possuem uma série de características positivas, além do crescimento e densidade: são resistentes à maioria das pragas que causam danos aos plantios de eucalipto. Essa característica é herdada da espécie *C. torelliana*, resistente a estas pragas, enquanto a espécie *C. citriodora* é suscetível à maioria (REIS et al., 2014).

Alguns trabalhos avaliaram as características da madeira das espécies *C. citriodora* e *C. torelliana*, incluindo sua utilização como matéria-prima para a produção de celulose. Gardner, Little e Arbuthnot (2007) avaliaram a produção de madeira e polpa celulósica de 11 espécies

de eucalipto plantadas na África do Sul. A espécie *C. citriodora* apresentou alta densidade básica ($0,637 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) e polpação com rendimento depurado de 54,3%, com número kappa da polpa de 29,4, e consumo específico de madeira de $2,89 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$.

Para a madeira de *C. citriodora*, Mezzomo (1996) encontrou densidade básica de $0,650 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, teor de lignina de 22,3%, 17,9% de pentosanas e 0,47% de cinzas.

Em um estudo sobre diferentes matérias primas para a produção de polpa celulósica, Barrichelo e Brito (1976) encontraram densidade básica de $0,465 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, teor de lignina de 22,0%, 23,0% de pentosanas e 1,0% de cinzas para a madeira de *C. torelliana*.

Foelkel, Barrichelo e Milanez (1975) realizaram um estudo comparativo entre as espécies *Eucalyptus saligna*, *E. paniculata*, *E. citriodora* (atual *C. citriodora*), *E. maculata* e *E. tereticornis* para a produção de celulose. Os autores encontraram que a madeira de *C. citriodora* apresenta alta densidade básica, alto teor de pentosanas, necessita de maior aplicação de álcali, possui altos rendimentos em celulose, alto teor de rejeitos e boas propriedades físico-mecânicas, com destaque para o alto índice de rasgo.

Mezzomo (1996) estudou as espécies *Eucalyptus cloeziana*, *C. citriodora*, *E. urophylla* e *E. urophylla* x *E. grandis* para a produção de celulose solúvel. Dentre as espécies analisadas, o autor destaca a madeira de *C. citriodora*, que apresentou a maior deslignificação, produzindo polpa com alta alvura e alta viscosidade.

Em seu estudo sobre diferentes espécies de eucalipto para a produção de polpa, Barrichelo e Brito (1976) encontraram rendimento depurado de 50,1% e 0,4% de rejeitos no cozimento de *C. torelliana*. A polpa proveniente deste cozimento possui viscosidade de $1.200 \text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ e alvura de 28,8% ISO.

2.2 Densidade básica da madeira

A densidade da madeira é considerada um dos parâmetros mais importantes na avaliação de sua qualidade para diversos usos, uma vez que apresenta relação com outras características da madeira (BURGER; RICHER, 1991). De acordo com Trugilho et al. (1990), a densidade da madeira pode ser determinada de duas maneiras, sendo a primeira incluindo o volume referente aos poros da madeira e a segunda subtraindo o volume dos espaços vazios da madeira de seu volume total.

De acordo com Foelkel, Brasil e Barrichelo (1971), a densidade básica é um importante fator na determinação das propriedades físicas e mecânicas que caracterizam diferentes

espécies de madeira, diferentes árvores de uma dada espécie e diferentes regiões de uma mesma árvore.

A densidade da “substância madeira”, também chamada de densidade real da madeira ou densidade da parede celular, é calculada com a exclusão dos espaços vazios da madeira, ou seja, considera apenas o material da parede celular. Essa densidade é de $1,53 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ quando a análise é realizada com imersão da madeira em água (FOELKEL; BRASIL; BARRICHELO, 1971; PANSIN; DE ZEEUW, 1980).

Como a madeira é um material poroso e de grande variabilidade, a compreensão da proporção da “substância madeira” com a porosidade existente é necessária para o melhor uso do material (MOUTINHO, 2013). Bowyer, Shmulsky e Haygreen (2007) e Skaar (1984) definem densidade aparente como a relação entre unidade de massa pelo volume nas mesmas condições de umidade. De acordo com Moutinho (2013), no Brasil padronizou-se a utilização da umidade de equilíbrio da madeira de 12%, simulando o comportamento da madeira quando em equilíbrio com o ambiente. Porém, dependendo da finalidade da análise de densidade, outras umidades podem ser utilizadas.

A densidade básica é um índice calculado pela relação entre a massa de madeira seca e seu volume obtido acima do ponto de saturação das fibras (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968). De acordo com Benjamin (2006), a facilidade em sua determinação e a estreita relação com a maior parte das demais características da madeira torna a densidade básica um importante parâmetro para avaliação da qualidade da madeira e para outras estimativas na análise de povoamentos florestais.

De acordo com Santos (2005), a densidade básica apresenta correlação com as propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira, sendo sua variação associada ao teor de holocelulose, lignina e extrativos, com a frequência de vasos e parênquima, a espessura da parede celular e a proporção de lenho tardio. A variação deste parâmetro ocorre entre espécies e também dentro da própria árvore (MILAGRES, 2009). Suas variações dependem das mudanças na proporção dos vasos e das espessuras das paredes celulares das fibras. O aumento da densidade básica da madeira está geralmente relacionado ao aumento da espessura da parede celular das fibras em relação, por exemplo, à proporção de vasos. De maneira inversa, um aumento na proporção de vasos, com ou sem decréscimo na espessura da parede celular, leva à redução da densidade na madeira (LEPAGE, 1986; OLIVEIRA, 1997; OLIVEIRA E SILVA, 2003).

De acordo com Ruy (1998), a densidade básica é influenciada pela base genética, pelo ambiente e pela interação entre esses fatores. Alzate (2004) cita diversos fatores que

influenciam a densidade básica da madeira, como idade, taxa de crescimento das árvores, clima, tratamentos silviculturais e sítio.

Alencar (2002), estudando híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* entre 1 e 7 anos, destaca que a densidade básica é altamente influenciada pela idade das árvores. O autor constatou incremento da densidade básica e do comprimento das fibras com o aumento da idade da floresta.

Avaliando a madeira de um mesmo clone de *E. grandis* x *E. urophylla* com diferentes idades e produtividades, Silva (2011) descreve que a densidade básica aumenta com a idade e diminui com o aumento de produtividade silvicultural.

Santos e Sansígolo (2007) encontraram forte correlação entre a densidade básica e o teor de holocelulose de madeiras do cerrado. Wehr e Barrichelo (1992) observaram que madeiras mais densas apresentam maior teor de extrativos, maior teor de lignina e menor teor de holocelulose. Já Shimoyama e Barrichelo (1991), em um estudo sobre *E. grandis*, não constataram nenhuma relação entre densidade básica e composição química.

Dentro de um mesmo indivíduo, há basicamente três formas de variação longitudinal da densidade da madeira: a densidade pode decrescer uniformemente no sentido base-topo, decrescer da base até a metade da altura do tronco e partir daí crescer até o topo da árvore; ou crescer de forma desuniforme da base para o topo (PANSHIN; DE ZEUD, 1970).

A densidade básica é aceita como um dos principais parâmetros para avaliação da qualidade da madeira, além de apresentar alta herdabilidade e correlação com outras características de qualidade da madeira. De acordo com Pereira et al. (2000), a densidade básica da madeira é uma das principais características a serem consideradas, uma vez que está relacionada com alguns aspectos tecnológicos como a contração e o inchamento da madeira, a resistência mecânica, o rendimento e qualidade da polpa celulósica e a produção e qualidade do carvão vegetal.

Na Tabela 1 são apresentados resultados de densidade básica da madeira de diferentes espécies e híbridos de folhosas descritas na literatura.

Tabela 1 – Densidade básica de diferentes madeiras de folhosas

Espécie/Híbrido	Referência	Idade	Densidade básica, g cm⁻³
<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Vivian (2015)	5	0,447
<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Segura (2012)	6	0,469
<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Duarte (2006)	6	0,478
<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Alencar (2002)	6	0,520
<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Bonfatti Jr. (2014)	6	0,501
<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Schmidt (2014)	7	0,444
<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Almeida (2003)	7	0,499
<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Bassa (2006)	7	0,502
<i>Eucalyptus grandis</i>	Machado et al. (1986)	7	0,444
<i>Eucalyptus grandis</i>	Sturion et al. (1987)	10,5	0,525
<i>Eucalyptus urophylla</i>	Souza (2012)	4,5	0,509
<i>Eucalyptus urophylla</i>	Moutinho (2013)	5	0,504
<i>Eucalyptus urophylla</i>	Moutinho (2013)	6	0,524
<i>Eucalyptus saligna</i>	Sturion et al. (1987)	10,5	0,562
<i>Eucalyptus globulus</i>	Bassa (2006)	7	0,497
<i>Eucalyptus nitens</i>	Segura et al. (2012)	12	0,525
<i>Corymbia citriodora</i>	Brito e Barrichelo (1977)	8	0,710
<i>Corymbia citriodora</i>	Sturion et al. (1987)	10,5	0,715
<i>Corymbia citriodora</i>	Benjamin (2006)	29	0,768
<i>Corymbia torelliana</i>	Machado et al. (1986)	7	0,511
<i>Corymbia torelliana</i>	Santini Junior et al. (2010)	8	0,500
<i>Corymbia torelliana</i>	Brocco et al. (2012)	15	0,550
<i>Corymbia torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	Moutinho (2013)	5	0,610
<i>Corymbia citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>	Moutinho (2013)	5	0,607
<i>Acacia mearnsii</i>	Segura, Zanão e Silva Jr. (2010)	6	0,516
<i>Acacia mangium</i>	Segura, Zanão e Silva Jr. (2010)	6	0,522
<i>Acacia crassicarpa</i>	Segura, Zanão e Silva Jr. (2010)	6	0,569
<i>Populus tremuloides</i>	Segura et al. (2012)	55	0,378
<i>Betula pendula</i>	Duarte (2006)	67	0,505

A densidade básica da madeira, apesar de ser uma propriedade complexa, é de simples determinação (FOELKEL; MORA; MENOCHELLI, 1992), sendo definida como a relação entre a massa absolutamente seca de madeira e seu volume saturado (SILVA JÚNIOR, 2005).

Trugilho et al. (1990) afirmam que existem diversos métodos para determinação da densidade básica da madeira. Os autores salientam que a maior dificuldade encontrada nesses

métodos é a obtenção do volume real do corpo de prova, já que os métodos de medição do volume por via direta tendem a ser pouco precisos, com as amostras muitas vezes apresentando formatos irregulares. Por esse motivo, vários métodos de determinação da densidade básica que estimam o volume do material de forma indireta foram desenvolvidos. Entre eles, podem ser destacados os métodos do máximo teor de umidade e os de imersão.

Os métodos que utilizam deslocamentos de líquidos são amplamente utilizados para a determinação da densidade básica da madeira (FOELKEL; BARRICHELO; BRASIL, 1971).

De acordo com Foelkel, Barrichelo e Brasil (1971), Keyl Werth desenvolveu em 1954 um método baseado na relação entre a densidade básica e o máximo teor de umidade da madeira, no qual são necessárias apenas duas pesagens: uma com a amostra completamente saturada de água e outro com a amostra seca em estufa $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ até massa constante. Foelkel, Barrichelo e Brasil (1971) descrevem que Scaramuzzi comparou diversos métodos de determinação da densidade básica da madeira, concluindo que o método do máximo teor de umidade era o que apresentava o menor desvio em relação ao método da imersão em água, além de ser rápido e de fácil execução.

Foelkel, Brasil e Barrichelo (1971) relacionaram a importância da densidade básica para a indústria de celulose e papel com os seguintes aspectos: rendimento bruto de celulose, velocidade de impregnação da madeira pelo licor de cozimento no processo de deslignificação, o refino da celulose e propriedades físico-mecânicas da polpa em relação à resistência ao rasgo, resistência à ruptura, arrebentamento e peso específico aparente.

Barrichelo (1983) afirma que a densidade básica está relacionada com o rendimento do processo, a velocidade de impregnação da madeira, o refino de celulose e as propriedades da polpa celulósica e do papel.

Segundo Jacob e Balloni (1978), a velocidade de impregnação dos cavacos e o ritmo de deslignificação da madeira são influenciados pela densidade básica. Sabe-se que, quanto menos densa for a madeira, maior a facilidade de impregnação e deslignificação pela maior presença de espaços vazios.

Barrichelo (1983) e Queiroz et al. (2004) encontraram relação inversa entre densidade e rendimento de celulose, que pode estar relacionada à maior dificuldade de impregnação dos cavacos de maior densidade, o que resulta em maior demanda de álcali no cozimento e, consequentemente, em menor rendimento.

Demuner et al. (1991) afirmam que a densidade básica da madeira influencia o coeficiente de flexibilidade da fibra, o número de fibras por grama e o *coarseness* da polpa.

De maneira geral, a polpa celulósica produzida com madeira de menor densidade apresenta fibras com menor espessura de parede, sendo mais adequada para a produção de papéis de imprimir e escrever. Já a polpa de madeiras mais densas é mais adequada para a produção de papéis absorventes. De acordo com Silva Júnior, Muner e Vale (1995), madeiras de maior densidade básica tendem a apresentar fibras mais espessas, menor volume de tecido parenquimático e menor frequência de vasos.

Fernandes et al. (2011), avaliando a influência da produtividade de 15 clones híbridos de eucalipto no extremo sul da Bahia, concluíram que a produtividade influenciou negativamente a densidade das madeiras estudadas, sendo que os clones que apresentaram maior densidade básica resultaram em menor rendimento de celulose. Apenas o nível mais baixo de produtividade resultou em menor rendimento de polpação e não houve correlação entre rendimento de polpação e a carga de álcali.

De acordo com Oliveira, Hellmeister e Tomazello Filho (2005), quanto mais homogênea a distribuição da densidade no interior do tronco, melhor será o comportamento da madeira nas operações de processamento.

Para a produção de polpa celulósica, Foelkel, Mora e Menochelli (1992) recomendaram o uso de madeiras com densidade básica entre 0,450 e 0,550 g cm⁻³. De acordo com os autores, acima deste nível de densidade básica a madeira apresenta dificuldade de picagem, aumento no teor de rejeitos do cozimento e aumento no consumo de reagentes químicos nos processos de cozimento e branqueamento.

2.3 Polpação kraft

Os processos químicos de polpação são aqueles em que cavacos de madeira ou de outro material fibroso são processados em uma solução química com o objetivo de remover a lignina e outras substâncias buscando a individualização das fibras (CASEY, 1984).

Os dois principais processos de polpação química são o processo soda e o processo kraft (ASSUMPÇÃO et al., 1988). De acordo com Fraga, Silva Jr. e Gonzalez (2002), no processo de polpação soda o agente deslignificante é o hidróxido de sódio (NaOH), caracterizando-se pela produção de polpas com menor resistência quando comparado ao processo kraft.

Criado em 1879 por Dahl, químico alemão, o processo kraft de polpação é hoje o mais utilizado no mundo para produção de polpa celulósica. De acordo com Vasconcelos (2005), em um esforço para encontrar um substituto para o carbonato de sódio (Na₂CO₃) no ciclo de recuperação química do processo soda, foi introduzido o sulfato de sódio (Na₂SO₄), sendo

este reduzido a sulfeto de sódio (Na_2S) pela ação da fornalha da caldeira de recuperação e então introduzido no sistema de polpação. Segundo Smook (1994), Dahl constatou que a introdução do sulfeto de sódio no licor de cozimento acelerava as reações de deslignificação, produzindo polpa mais resistente. Assim, os principais reagentes químicos no licor de cozimento kraft são o hidróxido de sódio (NaOH) e o sulfeto de sódio (Na_2S).

Tanto o NaOH quanto o Na_2S são eletrólitos que, em solução aquosa, dissociam-se formando os íons Na^+ , OH^- , HS^- e S^{2-} . Apesar de outras substâncias químicas estarem presentes no licor de cozimento, apenas os íons OH^- , HS^- e S^{2-} são ativos nas reações de polpação (GOMIDE, 1979). O sulfeto de sódio é dissociado de acordo com as seguintes reações químicas (RYDHOLM, 1965):

Os íons de sulfeto reagem com a água de acordo com as seguintes reações de hidrólise (RYDHOLM, 1965):

Durante a polpação, a reação 2 é completa, enquanto a reação 3 é insignificante. Desta forma, a quantidade de álcali disponível para as reações deve ser expressa como álcali efetivo ($\text{NaOH} + \frac{1}{2} \text{Na}_2\text{S}$) (PINHO; CAHEN, 1981).

Bassa (2002) cita que, durante a polpação kraft, a remoção de hemiceluloses e lignina favorece a difusão de reagentes para o interior da parede das fibras e, conseqüentemente, o acesso destes à lamela média, provocando alterações estruturais nas fibras. Além disso, as reações dos polissacarídeos (celulose e hemiceluloses) têm efeito acentuado no rendimento e nas características da polpa, como viscosidade e propriedades físico-mecânicas, bem como no consumo de reagentes químicos.

Gomide (1979) afirma que apenas as estruturas de lignina reagem com o sulfeto durante o cozimento kraft. Esta reação forma tioligninas, estruturas solúveis no licor de cozimento. A maior parte dos reagentes químicos empregados é consumida em reações de neutralização de compostos ácidos orgânicos formados durante as reações de degradação dos carboidratos.

As principais vantagens do processo kraft em relação aos demais são: adaptação a praticamente todos os tipos de madeira ou outros materiais lignocelulósicos, produção de polpas de alta qualidade com excelentes propriedades de resistência, possibilidade de

branqueamento da polpa a altos níveis de alvura e um eficiente sistema de recuperação de reagentes químicos e energia (GOMIDE; OLIVEIRA; COLODETTE, 1980; ASSUMPÇÃO et al., 1988).

Como desvantagens deste processo podem ser citadas o forte odor, resultado da formação de compostos de enxofre, o baixo rendimento do processo em polpa, baixa alvura da polpa não branqueada, alto custo de investimento na construção da fábrica e alto custo de branqueamento (GOMIDE; VIVONE; MARQUES, 1987; ASSUMPÇÃO et al., 1988; GULLICHSEN, 1999; VASCONCELOS, 2005).

Uma das principais vantagens do processo kraft é a recuperação dos reagentes químicos utilizados no processo. Para isso, o licor negro extraído da polpa, contendo de 14 a 17% de sólidos é enviado para a evaporação, onde parte da água é evaporada, concentrando o licor a um teor de sólidos de 65 a 85% (HOUGH, 1985).

O licor negro concentrado é então enviado para a caldeira de recuperação, que é um gerador de vapor utilizando o licor negro concentrado como combustível. Na caldeira de recuperação os materiais orgânicos são oxidados por combustão para geração de vapor e, conseqüentemente, energia. O material que resulta desta queima é chamado de *smelt*, composto basicamente por carbonato de sódio (Na_2CO_3) e sulfeto de sódio (Na_2S) (GRACE, 1985; MENESES, 2005).

A conversão do *smelt* a licor de cozimento ocorre na área de caustificação, onde este material é dissolvido em água formando o licor verde. As impurezas do licor verde, chamadas de *dregs*, são removidas por filtração ou centrifugação, enquanto o licor verde clarificado reage com cal apagada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que é resultado da reação da cal (CaO) com água (WANG; TESSIER; ENGLEZOS, 1994) ou filtrado. Esta reação converte o carbonato de sódio presente no licor verde em hidróxido de sódio, conforme abaixo (CAMERON; KICK, 2012):

Como resultado desta reação, há geração de lama de cal (CaCO_3), que é filtrada, originando o licor branco, utilizado no processo de cozimento. A lama de cal é lavada em clarificadores antes de ser queimada no forno de cal, que converte a lama de cal em cal (GRACE, 1985).

De acordo com Tran e Vakkilainen (2008), o processo de recuperação química do licor kraft apresenta três funções principais: minimizar os impactos ambientais do licor negro, recuperar os químicos do processo de polpação e gerar vapor e energia. A Figura 7 apresenta o esquema de uma fábrica de celulose kraft com máquina de papel integrada.

Segundo Bassa (2002), inúmeras tecnologias para modificação do processo kraft estão disponíveis, tanto para processos contínuos quanto para descontínuos. Dentre os descontínuos, destacam-se o RDH (Rapid Displacement Heating), o SuperBatch e o EnerBatch. Já entre os contínuos, podem ser destacados o MCC (Modified Continuous Cooking), o EMCC (Extended Modified Continuous Cooking), o ITC (Isothermal Cooking), o Compact Cooking e o Lo Solids®.

De acordo com Laakso (2008), o desenvolvimento dos processos contínuos modificados se deu com a empresa Kamyr. O primeiro processo modificado contínuo desenvolvido pela empresa foi o MCC (Modified Continuous Cooking). Depois disso, a empresa se dividiu em 1989 e o desenvolvimento dos processos levou a diferentes modificações nos digestores. O processo da Ahlström foi chamado de EMCC (Extended Modified Continuous Cooking) e, mais tarde, de Lo-Solids, enquanto que o sistema de cozimento da Kvaerner foi nomeado como ITC (IsoThermal Cooking) e mais tarde como CC (Compact Cooking).

A Figura 8 apresenta o desenvolvimento e nomenclatura dos diferentes processos de cozimento modificado contínuo.

Figura 8 – Desenvolvimento e nomenclatura dos diferentes processos de cozimento modificado contínuo

Fonte: (adaptado de LAAKSO, 2008)

Atualmente, as principais tecnologias de cozimento são o Compact Cooking e o Lo-Solids®. O cozimento Compact Cooking é baseado na impregnação com licor negro, em que parte do licor de cozimento é extraída do digestor e recirculada no vaso de impregnação (LAAKSO, 2008).

Já o cozimento Lo Solids® é fundamentado na distribuição da carga alcalina ao longo do processo, com o objetivo de minimizar a concentração de sólidos dissolvidos da madeira, mantendo um perfil alcalino e temperaturas de cozimento uniformes, menor concentração de lignina na fase final e máxima sulfidez na fase inicial do cozimento (MARCOCCIA; STROMBERG; PROUGH, 1998; BASSA, 2002).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

Para a realização deste trabalho foram utilizadas madeiras de oito materiais genéticos distintos, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Materiais genéticos utilizados

Material genético	Código	Idade	Origem
<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	URG	6 anos	Eldorado Brasil
<i>Corymbia citriodora</i>	CIT 01	8 anos	Eldorado Brasil
<i>Corymbia citriodora</i>	CIT 02	18 anos	Eldorado Brasil
<i>Corymbia torelliana</i>	TOR	15 anos	Preservar
<i>Corymbia torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	T x C 01	7 anos	Aperam
<i>Corymbia torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	T x C 02	7 anos	Aperam
<i>Corymbia citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>	C x T 01	7 anos	Aperam
<i>Corymbia citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>	C x T 02	7 anos	Aperam

Por ser considerado um material de referência na produção de celulose no Brasil, o híbrido *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* foi utilizado como referência tecnológica para a produção de celulose sendo, portanto, utilizado como base de comparação neste trabalho. Já o material de *Corymbia citriodora* com 18 anos foi utilizado como referência de madeira de alta densidade, uma vez que combina a alta densidade natural da espécie (ARAÚJO, 2002; FOELKEL; BARRICHELO; MILANEZ, 1975; VIEIRA, 2004) com o fator idade, que contribui para o aumento da densidade básica da madeira (FERREIRA, 1972; TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996).

As coletas foram realizadas nos municípios de Selvíria e Água Clara, estado do Mato Grosso do Sul, Guarantã, estado de São Paulo, Periquito e Itamarandiba, estado de Minas Gerais (Figura 9).

Figura 9 – Municípios de coleta
Fonte: (GOOGLE MAPS, 2013)

A Tabela 3 apresenta os parâmetros silviculturais de cada um dos materiais genéticos utilizados neste trabalho. Os dados de Diâmetro a Altura do Peito (DAP) e altura comercial, considerada como altura da árvore em que o diâmetro do tronco apresenta 6 cm, foram coletados no campo quando da coleta das árvores, enquanto os dados de espaçamento de plantio e Incremento Médio Anual (IMA) foram informados pelas empresas proprietárias das áreas. As características meteorológicas dos locais em que as coletas foram realizadas são apresentadas no Apêndice A.

Tabela 3 – Caracterização dos materiais coletados e dos locais de coleta das amostras

Código	Ano de plantio	Data de coleta	Origem dos indivíduos	Localização geográfica	Município	Altura comercial, m	DAP médio, cm	Espaçamento de plantio, m	IMA c/c, m³·ha⁻¹·ano⁻¹
URG	2006	28/08/2012	clonagem	20°19'92''S; 51°32'11''W	Selvíria, MS	18,9	17,7	3 x 2	31,9
CIT 01	2004	06/09/2012	sementes	21° 57'18''S, 49°39'05''W	Guarantã, SP	17,8	16,9	3,5 x 1,5	27,0
CIT 02	1994	15/08/2012	sementes	19°52'75''S, 53°00'86''W	Água Clara, MS	20,6	21,4	*	**
TOR	1997	04/09/2012	sementes	19°05'54''S, 42°20'38''W	Periquito, MG	19,4	20,9	*	**
T x C 01	2005	09/08/2012	sementes cruz. controlados	17°82'48''S, 42°79'19''W	Itamarandiba, MG	14,8	14,4	3 x 2	17,7
T x C 02	2005	09/08/2012	sementes cruz. controlados	17°82'48''S, 42°79'19''W	Itamarandiba, MG	16,7	14,7	3 x 2	30,0
C x T 01	2005	09/08/2012	sementes cruz. controlados	17°82'48''S, 42°79'19''W	Itamarandiba, MG	14,5	14,9	3 x 2	25,3
C x T 02	2005	09/08/2012	sementes cruz. controlados	17°82'48''S, 42°79'19''W	Itamarandiba, MG	15,4	15,9	3 x 2	36,7

*não foi possível determinar o espaçamento

**sem informações de inventário

A Figura 10 apresenta fotos das áreas de coleta.

Figura 10 – Áreas de coleta. A: *C. citriodora* (Água Clara – MS); B: *C. torelliana* (Periquito – MG); C: *C. torelliana* x *C. citriodora* – T x C 01 (Itamarandiba – MG); D: *C. torelliana* x *C. citriodora* – T x C 02 (Itamarandiba – MG); E: *C. citriodora* x *C. torelliana* – C x T 01 (Itamarandiba – MG); F: *C. citriodora* x *C. torelliana* – C x T 02 (Itamarandiba – MG)

3.2 Amostragem

Foram amostradas 10 árvores com diâmetro médio do povoamento de cada um dos oito materiais genéticos utilizados neste trabalho, totalizando 80 árvores. De cada árvore, foram coletados 6 discos de 3 cm de espessura dos seguintes pontos: 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial e do DAP (1,30 m de altura). Foi considerada como altura comercial a região em que o tronco da árvore apresentava diâmetro de 6 cm. As regiões das árvores entre os discos foram traçadas em toretes de 70 cm, que foram descascados manualmente e transportados para picagem em laboratório. Os discos das alturas 0, 25, 50, 75 e 100% foram utilizados para a determinação da densidade básica da madeira e da casca, enquanto os discos do DAP foram utilizados nas análises de composição química e morfologia das fibras, conforme o esquema da Figura 11.

Figura 11 – Esquema de amostragem, em que Hc: altura comercial
Fonte: (adaptado de CASTRO 2014)

3.3 Picagem

A picagem dos toretes foi realizada em picador laboratorial acoplado a um trator. Os toretes das árvores que representavam a mesma amostra foram picados conjuntamente, formando uma amostra de cavacos composta de dez árvores. No total, foram produzidas 8 diferentes amostras de cavacos, uma de cada material genético.

3.4 Classificação granulométrica dos cavacos

Os cavacos foram classificados em conjunto de peneiras de barras para classificação em espessura. Foram utilizados os cavacos que passaram pela peneira de 6 mm e ficaram retidos na de 4 mm. Os nós e pedaços de casca foram removidos manualmente em laboratório com o objetivo de homogeneizar a amostra, sendo os cavacos aceitos acondicionados em sacos plásticos para condução das demais etapas do estudo.

3.5 Caracterização da madeira

3.5.1 Densidade básica dos discos

A densidade básica dos discos nas alturas de 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial (diâmetro de 6 cm) foi determinada pelo método da balança hidrostática. Os discos tiveram seus diâmetros com e sem casca medidos (duas medições perpendiculares, sendo o diâmetro considerado a média das duas medições), de acordo com a Figura 12.

Figura 12 – Diâmetros medidos nos discos, em que: d s/c: diâmetro sem casca; d c/c: diâmetro com casca

Depois de medidos os diâmetros, os discos foram colocados em água até completa saturação. Após a saturação, os discos foram divididos em quatro cunhas, das quais as duas opostas foram utilizadas na determinação da densidade básica (Figura 13).

Figura 13 – Cunhas utilizadas na determinação da densidade básica

A casca de cada cunha foi separada da madeira e também teve sua densidade determinada. As densidades básicas da madeira e da casca foram calculadas separadamente pelo Método da Balança Hidrostática (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003) a partir da Equação 1. A densidade das alturas de cada árvore considerada é a média da densidade das duas cunhas de cada disco analisadas no caso da madeira e dos dois segmentos analisados no caso da casca. O valor reportado de densidade básica das alturas para cada espécie ou híbrido é a média dos valores encontrados das 10 árvores analisadas de cada material.

$$dB = \frac{Ms}{Mu - Mi} \quad (1)$$

Em que:

dB: densidade básica da madeira ou casca, em g cm⁻³;

Ms: massa seca da madeira ou casca, em g;

Mu: massa úmida da madeira ou casca saturada, em g;

Mi: massa imersa da madeira ou casca saturada, em g.

As densidades básicas médias ponderadas da madeira e da casca foram determinadas de acordo com a Equação 2.

$$Dbp = \frac{1}{2} \cdot \frac{(D_0^2 + D_{2.5\%}^2) \cdot (d_0 + d_{2.5\%}) + (D_{2.5\%}^2 + D_{50\%}^2) \cdot (d_{2.5\%} + d_{50\%}) + (D_{50\%}^2 + D_{75\%}^2) \cdot (d_{50\%} + d_{75\%}) + (D_{75\%}^2 + D_{100\%}^2) \cdot (d_{75\%} + d_{100\%})}{D_0^2 + D_{100\%}^2 + 2 \cdot (D_{2.5\%}^2 + D_{50\%}^2 + D_{75\%}^2)} \quad (2)$$

Em que:

D_0 ; $D_{25\%}$, $D_{50\%}$, $D_{75\%}$ e $D_{100\%}$: diâmetros sem casca (densidade madeira) ou duas vezes a espessura da casca (densidade casca) nas diferentes alturas da árvore, em cm;

d_0 ; $d_{25\%}$, $d_{50\%}$, $d_{75\%}$ e $d_{100\%}$: densidade básica da madeira (densidade madeira) ou da casca (densidade casca) nas diferentes alturas da árvore, em g cm^{-3} ;

As porcentagens de casca em volume em cada altura da árvore e a porcentagem de casca em volume e em massa na árvore inteira foram determinadas a partir das equações 3, 4 e 5.

$$\% \text{casca vol. alturas} = 100 \cdot \frac{\frac{\pi \cdot d_{c/c}^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_{s/c}^2}{4}}{\frac{\pi \cdot d_{c/c}^2}{4}} = \frac{100 \cdot d_{c/c}^2 - d_{s/c}^2}{d_{c/c}^2} \quad (3)$$

Em que:

% casca vol. alturas: proporção de casca em volume na altura determinada, em %;

$d_{c/c}$: diâmetro com casca na altura determinada (diâmetro total);

$d_{s/c}$: diâmetro sem casca na altura determinada (diâmetro da madeira sem casca);

π : 3,14159265359.

$$\% \text{casca(volume)} = 100 \cdot \left(1 - \frac{D_0^2 + D_{100\%}^2 + 2 \cdot (D_{25\%}^2 + D_{50\%}^2 + D_{75\%}^2)}{DT_0^2 + DT_{100\%}^2 + 2 \cdot (DT_{25\%}^2 + DT_{50\%}^2 + DT_{75\%}^2)} \right) \quad (4)$$

Em que:

% casca(volume): proporção de casca na árvore em volume, em %;

D_0 ; $D_{25\%}$, $D_{50\%}$, $D_{75\%}$ e $D_{100\%}$: Diâmetros sem casca (madeira sem casca) nas diferentes alturas da árvore;

DT: diâmetro total (diâmetro com casca) nas diferentes alturas da árvore.

$$\% \text{casca(massa)} = 100 \cdot \left(\frac{\frac{\% \text{casca(volume)}}{100} \cdot Dbp_{\text{casca}}}{\left(\frac{\% \text{casca(volume)}}{100} \cdot Dbp_{\text{casca}} \right) + \left(\frac{100 - \% \text{casca(volume)}}{100} \cdot Dbp_{\text{madeira}} \right)} \right) \quad (5)$$

Em que:

% casca(massa): proporção de casca na árvore em massa, em %;

% casca(volume): proporção de casca na árvore em volume, em %;

Dbp casca: densidade básica média ponderada da casca, em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$;

Dbp madeira: densidade básica média ponderada da madeira, em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Para cada material analisado foi calculado o Índice de Heterogeneidade para densidade básica da madeira. Este índice expressa a variabilidade da densidade no sentido longitudinal, a partir das densidades obtidas dos discos (BARRICHELO; BRITO, 1984). De acordo com os autores a variação é mais significativa quanto mais próximos estiverem os pontos de amostragem e quanto mais na parte inferior da árvore estejam posicionados, considerando o fator de forma típico das árvores. Assim, é estipulado peso 4 para a diferença de densidade entre a base e 25% da altura, peso 3 para a diferença entre a densidade da base e 50% da altura, peso 2 para a diferença entre a densidade da base e 75% da altura e peso 1 para a diferença entre a densidade da base e 100% da altura comercial.

Os valores expressos nos resultados são as médias dos Índices de Heterogeneidade das 10 árvores de cada material genético. O Índice de Heterogeneidade foi calculado de acordo com a Equação 6.

$$IH = 4 \cdot (d_0 - d_{25\%}) + 3 \cdot (d_0 - d_{50\%}) + 2 \cdot (d_0 - d_{75\%}) + 1 \cdot (d_0 - d_{100\%}) + 3 \cdot (d_{25\%} - d_{50\%}) + 2 \cdot (d_{25\%} - d_{75\%}) + 1 \cdot (d_{25\%} - d_{100\%}) + 2 \cdot (d_{50\%} - d_{75\%}) + 1 \cdot (d_{50\%} - d_{100\%}) + 1 \cdot (d_{75\%} - d_{100\%}) \quad (6)$$

Em que:

IH: Índice de Heterogeneidade;

d_0 ; $d_{25\%}$, $d_{50\%}$, $d_{75\%}$ e $d_{100\%}$: densidade básica da madeira nas diferentes alturas da árvore, em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

3.5.2 Densidade básica dos cavacos

A densidade básica dos cavacos foi determinada pelo método do máximo teor de umidade (ABNT, 2003), tomando-se 10 amostras de cavacos saturados de aproximadamente 100 g, de cada um dos 8 materiais genéticos analisados. Cada amostra de 100 g de cavacos representou uma repetição, ou seja, foram realizadas 10 repetições desta análise por material.

Com base na densidade básica dos cavacos e no incremento médio anual (IMA), apresentado na Tabela 3, foi calculado o incremento médio anual mássico, de acordo com a Equação 7.

$$\text{IMA}_{\text{mássico}} = \text{IMA}_{\text{c/c}} \cdot (1 - \% \text{casca}(\text{volume})) \cdot \text{dB} \quad (7)$$

Em que:

$\text{IMA}_{\text{mássico}}$: incremento médio anual mássico, em $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$;

$\text{IMA}_{\text{c/c}}$: incremento médio anual com casca, em $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$;

$\% \text{casca}(\text{volume})$: teor de casca em volume, em decimal;

dB : densidade básica da madeira (cavacos), em $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

3.5.3 Densidade aparente de cavacos

A densidade aparente dos cavacos foi determinada com a utilização de 10 amostras de cavacos, cada uma representando uma repetição, que foram pesados em recipiente de volume conhecido. No presente trabalho foram utilizados béqueres de 4 litros. A densidade aparente dos cavacos foi calculada de acordo com a Equação 8.

$$D_a = \frac{m_a}{V_a} \quad (8)$$

Em que:

D_a = densidade aparente, em $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

m_a = massa seca dos cavacos, em g;

V_a = volume aparente dos cavacos secos, em cm^3 .

3.5.4 Composição química

Para a realização das análises químicas, foram utilizadas as amostras de madeira dos discos do DAP. Cada material foi caracterizado quimicamente a partir de uma amostra composta dos 10 discos de DAP. Cerca de 200 g de madeira retirada na altura do DAP de cada uma das 8 amostras foi moída em moinho laboratorial e a serragem oriunda deste processo foi classificada em conjunto de peneiras. Foi utilizada para as análises a fração de

serragem com granulometria entre 60 e 80 mesh. Os teores de extrativos totais e lignina (Klason, solúvel e total) da madeira foram determinados de acordo com o método descrito no Apêndice B. Foram realizadas 5 repetições na análise de extrativos totais e 3 repetições nas análises de lignina. O teor de holocelulose foi calculado por diferença, de acordo com a equação 9.

$$\text{Holocelulose (\%)} = 100 - (\text{Extrativos (\%)} + \text{Lignina (\%)}) \quad (9)$$

Em que:

Extrativos (%): teor de extrativos totais, em %;

Lignina (%): teor de lignina total, em %;

A análise de cinzas seguiu a norma TAPPI T211, com 5 repetições.

3.5.5 Morfologia das fibras

Para determinação das dimensões das fibras, foram utilizados cerca de 50 g de cavacos, dos quais foram retirados fragmentos de madeira para maceração. Os mesmos foram colocados em tubo de ensaio com solução de peróxido de hidrogênio e ácido acético em uma proporção de 1:1, e mantidos em estufa a 60°C por 48 horas para que as fibras se individualizassem. Depois de retirados do tubo de ensaio e lavados em água destilada para remover as substâncias utilizadas na maceração, as lâminas foram montadas com adição de 1 gota de safranina, 1 gota de glicerina e 1 gota de água.

Foram preparadas 10 lâminas de cada material analisado, das quais foram adquiridas imagens em microscópio óptico com câmera digital acoplada e software específico. Por meio do software Image Pro Plus foram realizadas as medições de 10 fibras por lâmina (totalizando 100 fibras por material), referentes aos seguintes parâmetros: comprimento, largura e diâmetro do lume. Os aumentos utilizados foram 25 x (medida do comprimento) e 400 x (medidas de largura e diâmetro do lume). Os parâmetros espessura da parede e fração parede foram calculados a partir das equações 10 e 11.

$$E = \left(\frac{L - D}{2} \right) \quad (10)$$

$$FP(\%) = \frac{2 \cdot E}{L} \cdot 100 \quad (11)$$

Em que:

E: espessura da parede, em μm ;

L: largura da fibra, μm ;

D: diâmetro do lume, em μm ;

FP: fração parede, em %.

3.6 Cozimentos

Os cozimentos modificados do tipo Lo-Solids[®] foram realizados em triplicata em digestor de circulação forçada, com dois vasos de aço inoxidável com capacidade de 10 litros cada, onde se acoplou uma bomba dosadora de alta pressão e precisão. Em cada cozimento foi utilizada massa equivalente a 1.000 g de cavacos (massa seca), sendo que o objetivo dos cozimentos foi atingir um número kappa de 18, com uma variação de 5% ($18 \pm 0,9$), nas polpas produzidas com os materiais avaliados. O álcali aplicado e o fator H foram variáveis para cada matéria-prima. A sulfidez utilizada foi de 32% e a relação licor:madeira de $4 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$. A carga alcalina foi dividida em três fases de aplicação, sendo 50% aplicada na impregnação, 30% na primeira injeção e 20% na segunda injeção. Antes de cada injeção foi feita a remoção de um volume equivalente de licor de cozimento para que a relação licor:madeira fosse mantida. As fases do cozimento e a distribuição da carga alcalina são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Tempo, temperatura e distribuição da carga alcalina nas fases dos cozimentos

Fases	Tempo (min.)	Temperatura (°C)	Distribuição da Carga Alcalina (%)
Pré-vaporização	20	100	-
Impregnação	30	120	50
1ª substituição + cozimento	110	variável	30
2ª substituição + cozimento	125	variável	20

3.6.1 Análises da polpa

Após os cozimentos, foram determinados os parâmetros referentes às polpas marrons, descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros determinados nas polpas marrons

Parâmetro	Norma/Procedimento
Rendimento bruto	Relação entre a massa a.s.* de polpa celulósica e a massa a.s.* de madeira
Rendimento depurado	Relação entre a massa a.s.* de polpa celulósica depurada e a massa a.s.* de madeira
Teor de rejeitos	Relação entre a massa a.s.* de rejeitos (material retido em peneira com fenda de 0,2mm de depurador laboratorial) e a massa a.s. de madeira
Número kappa	TAPPI Methods – T236cm-85
Ácidos hexenurônicos	TAPPI Methods – T282pm-07
Viscosidade	TAPPI Methods – T230 om-94
Alvura	ISO 2470

* massa a.s.: massa absolutamente seca

A partir dos parâmetros descritos na Tabela anterior foram calculados: número kappa corrigido (sem a participação dos ácidos hexenurônicos), seletividade do processo de polpação, consumo específico de madeira e IMACEL (incremento médio anual de celulose) conforme as equações 12 a 15.

a- Número kappa corrigido (LI; GELLERSTEDST, 1997):

$$KC = K - \left(\frac{H}{11,6} \right) \quad (12)$$

Em que:

KC: número kappa corrigido da polpa celulósica, sem a participação dos ácidos hexenurônicos;

K: número kappa da polpa celulósica;

H: teor de ácidos hexenurônicos da polpa celulósica ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$).

b- Seletividade:

$$\text{Sel.} = \frac{\text{Visc.}}{K} \quad (13)$$

Em que:

Sel.: seletividade do processo de polpação;

Visc.: viscosidade da polpa celulósica, em $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$;

K: número kappa da polpa celulósica.

c- Consumo específico de madeira (CEm), $\text{m}^3 \cdot \text{tsa}^{-1}$:

$$\text{CEm} = \left(\frac{1}{\text{dB} \cdot \text{RD}} \right) \times 0,9 \quad (14)$$

Em que:

dB: densidade básica da madeira (cavacos), em $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

RD: rendimento depurado, em decimal;

0,9: fator de conversão para tsa (tonelada seca ao ar), considerando polpa com 10% de umidade.

d- Incremento médio anual de celulose (IMACEL), $\text{tsa} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$:

$$\text{IMACEL} = \frac{\text{IMA}_{c/c} \cdot (1 - \% \text{casca (volume)})}{\text{CEm}} \quad (15)$$

Em que:

$\text{IMA}_{c/c}$: incremento médio anual de madeira com casca, em $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$;

%casca (volume): teor de casca em volume, em decimal;

CEm: consumo específico da madeira, em $\text{m}^3 \cdot \text{tsa}^{-1}$.

3.6.2 Análises do licor

Ao longo dos cozimentos, amostras de 30 mL de licor negro foram coletadas no início dos ensaios, antes de cada extração de licor negro, após cada injeção de licor branco e ao final dos cozimentos. Ao todo, foram amostrados 13 licores de cada ensaio. Os parâmetros analisados nestes licores e suas respectivas normas são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros determinados nos licores coletados ao longo dos cozimentos

Parâmetro	Norma
Álcali ativo residual, base NaOH, e pH	Método descrito no Apêndice C
Teor de sólidos totais	TAPPI Methods – T650 om-89
Teor de matéria orgânica	TAPPI Methods – T625 cm-85
Teor de matéria inorgânica	TAPPI Methods – T625 cm-85

A partir dos resultados dos cozimentos e dos parâmetros descritos na Tabela 6 foram calculados o teor de sólidos gerados por tonelada de polpa celulósica produzida, o álcali ativo consumido por cozimento e o álcali ativo consumido por tonelada de celulose produzida, de acordo com as Equações 16 a 18.

a- Teor de sólidos gerados por tonelada de polpa celulósica (tss/adt), $t \cdot tsa^{-1}$:

$$tss/adt = \frac{(1 - RB) + AA}{RD} \times 0,9 \quad (16)$$

Em que:

RD: rendimento depurado, em decimal;

RB: rendimento bruto, em decimal;

AA: álcali Ativo aplicado, em decimal;

0,9: fator de conversão para tsa (tonelada seca ao ar), considerando polpa com 10% de umidade.

a- Álcali ativo consumido por cozimento, base NaOH ($g \cdot L^{-1}$):

$$AAC = AAA - AAR \quad (17)$$

Em que:

AAA: álcali ativo aplicado, em $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;

AAR: álcali ativo residual, em $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

b- Álcali ativo consumido por tonelada de celulose, base NaOH ($\text{kg}\cdot\text{tsa}^{-1}$):

$$AAC = \frac{AAC \cdot LM}{RD} \times 0,9 \quad (18)$$

Em que:

AAC: álcali ativo consumido, em $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;

LM: relação licor:madeira, em $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$;

RD: rendimento depurado, em decimal;

0,9: fator de conversão para tsa (tonelada seca ao ar), considerando polpa com 10% de umidade.

3.7 Deslignificação com oxigênio

A deslignificação com oxigênio foi realizada em duplo estágio (OO), em triplicata, com a utilização de um reator/misturador Quantum-Mark, com amostras de 290 g a.s. (absolutamente secas) das polpas de acordo com as condições descritas na Tabela 7 para todos os materiais analisados.

Tabela 7 - Condições da deslignificação com oxigênio

Parâmetros	Valor
Consistência (%)	11
Temperatura (°C)	95 + 100
Tempo (min.)	10 + 50
Pressão (bar)	5,5
NaOH ($\text{kg}\cdot\text{tsa}^{-1}$)	19
pH final	>10,8

Após a deslignificação com oxigênio, foram determinados os seguintes parâmetros nas polpas celulósicas: número kappa, ácidos hexenurônicos, alvura, viscosidade e número kappa corrigido (de acordo com o item 3.6.1 deste trabalho). Além destes parâmetros, foram

calculadas as eficiências de redução de kappa e eficiência da deslignificação, de acordo com as equações 19 e 20.

a- Eficiência de redução de kappa (%):

$$\text{Efic. red. kappa} = \frac{K_i - K_f}{K_i} \cdot 100 \quad (19)$$

Em que:

K_i: número kappa da polpa marrom;

K_f: número kappa da polpa após a deslignificação com oxigênio.

b- Eficiência de deslignificação (%):

$$\text{Efic. deslig.} = \frac{K_{Ci} - K_{Cf}}{K_{Ci}} \cdot 100 \quad (20)$$

Em que:

K_{Ci}: número kappa corrigido da polpa marrom, sem a participação dos ácidos hexenurônicos;

K_{Cf}: número kappa corrigido da polpa após a deslignificação com oxigênio, sem a participação dos ácidos hexenurônicos.

3.8 Branqueamentos

As polpas deslignificadas com oxigênio foram branqueadas em triplicata através da sequência DA Ep D₁ P, objetivando alvura de $89,5 \pm 0,5\%$ ISO na polpa final.

Os reagentes foram misturados com a polpa celulósica manualmente em sacos de polietileno. Após essa etapa, a polpa foi transferida para banho termostatzado com temperatura controlada de acordo com o estágio de branqueamento, onde foi mantido durante o tempo pré-estabelecido. Terminado o tempo de reação, foram extraídas amostras de licor para análises de pH e residual. As polpas foram lavadas com água destilada em abundância em temperatura ambiente. As condições das etapas do branqueamento podem ser observadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Condições dos estágios de branqueamento

Parâmetros	Estágio do branqueamento			
	DA	Ep	D ₁	P
Consistência (%)	11	11	11	11
Temperatura (°C)	90	85	80	80
Tempo (min.)	90	60	60	90
H ₂ O ₂ (kg·tsa ⁻¹)	-	3,0	-	0,5-4,0**
ClO ₂ (kg·tsa ⁻¹)	fk = 0,2*	-	2,8-6,5**	-
NaOH (kg·tsa ⁻¹)	-	8	-	2
H ₂ SO ₄ (kg·tsa ⁻¹)	4,0	-	1,5	-
pH final	>2,5	>10,5	>3,0	>10,5

*fator kappa: $Carga\ ClO_2\ (kg \cdot tsa^{-1}) = (\#kappa\ anterior \times fk \times 10) / 2,63$

** Condição variável - busca por alvura final de $89,5 \pm 0,5\%$ ISO

DA: Estágio ácido com aplicação de dióxido de cloro e extração ácida;

Ep: Estágio de extração alcalina com peróxido de hidrogênio;

D₁: Estágio ácido com aplicação de dióxido de cloro;

P: Estágio alcalino com aplicação de peróxido de hidrogênio.

Após cada estágio do branqueamento foram determinados os seguintes parâmetros das polpas, cujas normas são citadas na Tabela 5: número kappa, alvura e viscosidade. Na polpa branqueada foi determinada, além dos parâmetros já citados, a reversão de alvura (T 260 om-91). O consumo de cloro ativo do processo de branqueamento e a branqueabilidade das polpas foram calculados de acordo com as equações 21 e 22.

a- Consumo de cloro ativo total (CAT) do processo de branqueamento (kg·tsa⁻¹):

$$CAT = CD \cdot 2,63 + CP \cdot 2,09 \quad (21)$$

Em que:

CD: consumo total de dióxido de cloro (ClO₂) ao longo da sequência de branqueamento (kg·tsa⁻¹);

2,63: fator de conversão de dióxido de cloro para o equivalente em cloro ativo.

CP: consumo total de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) ao longo da sequência de branqueamento (kg·tsa⁻¹);

2,09: fator de conversão de peróxido de hidrogênio para o equivalente em cloro ativo.

b- Branqueabilidade:

$$\text{Branqueab.} = \frac{Kf}{CAT} \quad (22)$$

Em que:

Kf: número kappa da polpa após a deslignificação com oxigênio;

CAT: consumo de cloro ativo equivalente do processo de branqueamento ($\text{kg} \cdot \text{tsa}^{-1}$).

3.9 Morfologia das fibras das polpas branqueadas

A morfologia das fibras das polpas branqueadas em todos os níveis de refino foi determinada utilizando-se o equipamento Fiber Tester, que permite a obtenção de imagens ópticas de fibras dispersas em água. O aparelho tem uma estrutura eletromecânica, a qual é conectada a um computador, onde as imagens das fibras em suspensão são registradas para o tratamento de dados. As fibras, em suspensão aquosa na concentração de $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, passam por uma célula de medida constituída de um compartimento de geometria conhecida para a aquisição das imagens das fibras por uma câmera digital. Após a aquisição das imagens e medições, além da contagem do número de fibras, o equipamento calcula comprimento médio das fibras, largura média das fibras, fração parede média das fibras, *coarseness* e teor de finos em comprimento, de acordo com as equações 23 a 27.

$$CM = \frac{\sum Ci}{N} \quad (23)$$

$$LM = \frac{\sum Li}{N} \quad (24)$$

$$FP(\%) = \frac{\sum 2 \cdot EPI}{\sum Li} \cdot 100 \quad (25)$$

$$Coarseness = \frac{m}{\sum Ci} \quad (26)$$

$$\text{Finos compr.} = \frac{\sum F_i}{\sum C_i} \cdot 100 \quad (27)$$

Em que:

CM: comprimento médio das fibras, em mm;

Ci: comprimento das fibras, em mm;

N: número de fibras;

LM: largura média das fibras, em μm ;

Li: largura das fibras, em μm ;

FP: fração parede, em %;

EPI: espessura de parede das fibras, em μm ;

Coarseness: *coarseness*, em $\text{mg} \cdot 100 \text{ m}^{-1}$;

m: massa das fibras, em mg;

Finos compr.: finos em comprimento, em %;

Fi: Comprimento dos elementos finos, classificados como aqueles com comprimento entre 5 e 200 μm , em mm.

3.10 Refino e testes físico-mecânicos das polpas branqueadas

Nesta etapa, as três polpas branqueadas de cada material genético foram misturadas, formando uma única amostra homogênea de cada material para a realização do refino e dos testes físico-mecânicos. As polpas foram refinadas em moinho PFI, segundo a norma ABNT - NBR 14345, utilizando o equivalente a 30 g secas, a 10% de consistência, nos níveis zero, 750, 1.500 e 3.000 revoluções.

Após o refino, foram formadas 8 folhas de $60 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, utilizadas para análise de testes físicos-mecânicos. Estas folhas foram climatizadas ($23 \pm 1^\circ\text{C}$ e $50 \pm 1\%$ de umidade relativa) por um período mínimo de 12 horas. Após climatização foram realizados os ensaios físico-mecânicos, sendo avaliados os parâmetros apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros determinados nas polpas branqueadas e refinadas

Parâmetro	Norma/Procedimento
Drenabilidade	ISO – 5267-1
Volume Específico	ISO – 534
Resistência à passagem do ar	ISO – 5636-5
Opacidade	ISO – 2469/2470/2471
Capilaridade Klemm	ISO – 8787
Índice de retenção de água	ISO – 23714
Índice de tração	ISO – 1924-3
Índice de estouro	ISO – 2758
Índice de rasgo	ISO – 1974

3.11 Dimensionamento de uma fábrica de celulose

Foi avaliado o impacto da utilização dos materiais genéticos analisados neste trabalho no dimensionamento de uma fábrica de celulose com capacidade para produção anual de 1.500.000 toneladas de polpa celulósica branqueada. Considerou-se que picagem de toras, peneiramento de cavacos, extração de cavacos da pilha de estocagem para o digestor, alimentação do digestor, evaporação, caldeira de recuperação e caustificação seriam as áreas da fábrica cujo dimensionamento poderia ser modificado pela utilização de diferentes madeiras como matéria-prima para a produção de celulose. As demais áreas principais de uma fábrica de celulose (cozimento, deslignificação com oxigênio e secagem) não foram consideradas nesta análise, uma vez que a mudança da matéria-prima não afetaria o dimensionamento destas áreas. No presente trabalho, a etapa de peneiramento de cavacos foi posicionada após a picagem de toras, ou seja, antes da pilha de cavacos. Outra opção seria posicionar o peneiramento após a pilha de cavacos/extração, ou seja, antes da alimentação do digestor.

Considerou-se a operação da fábrica em 354 dias por ano, sendo os demais dias reservados para manutenção programada (parada geral anual). As eficiências das áreas utilizadas nos cálculos, apresentadas na Tabela 10, foram baseadas no histórico de eficiências medidas em fábricas de celulose e equivalem à disponibilidade operacional de tempo de cada área, sendo os valores usualmente aplicados para dimensionamento dessas áreas.

Tabela 10 – Eficiências operacionais das áreas avaliadas

Área	Eficiência, %
Picagem de toras	75
Peneiramento de cavacos	75
Extração de cavacos e alimentação do digestor	90
Evaporação	93
Caldeira de recuperação	93
Caustificação	90

Nas áreas referentes à preparação de cavacos, além das eficiências já apresentadas, foram consideradas perdas de 0,3% na alimentação de madeira e picagem de toras e 1,2% na etapa de peneiramento de cavacos, referentes aos cavacos descartados por granulometria. Esses cavacos são classificados como overs, cuja espessura excede à espessura máxima requerida para a produção de celulose, e finos, cuja espessura é inferior à espessura mínima aceita. Esses valores de perdas se baseiam em dados históricos de fábricas de celulose, sendo os valores usualmente utilizados no dimensionamento da área de preparação de cavacos. As representações esquemáticas das áreas consideradas para dimensionamento neste trabalho são apresentadas nas Figuras 14 e 15.

Figura 14 – Representação esquemática das áreas de picagem de toras, peneiramento de cavacos, extração e alimentação do digestor

Figura 15 – Representação esquemática das áreas de evaporação, caldeira de recuperação e caustificação

Para o dimensionamento de cada área da fábrica, os resultados dos cozimentos experimentais realizados neste trabalho foram utilizados nos cálculos, sendo que este dimensionamento foi realizado para cada um dos oito materiais genéticos estudados (equações 28 a 34). Assim, pode-se entender que oito diferentes fábricas de celulose foram dimensionadas, uma para cada material genético analisado.

- a- Consumo específico de madeira total, considerando as perdas na deslignificação com oxigênio, depuração, branqueamento e secagem de celulose ($\text{m}^3 \cdot \text{tsa}^{-1}$):

$$CE_{\text{mtotal}} = \left(\frac{1}{dB \cdot RD \cdot 0,9385} \right) \times 0,9 \quad (28)$$

Em que:

dB: densidade básica da madeira (cavacos), em $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

RD: rendimento depurado, em decimal;

0,9385: rendimento de 93,85% considerado para as áreas de deslignificação, depuração, branqueamento e secagem;

0,9: fator de conversão para tsa (tonelada seca ao ar), considerando polpa com 10% de umidade.

b- Dimensionamento da área de picagem de toras, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (volume sólido de madeira):

$$\text{Capacidade} = \frac{1.500.000 \cdot \text{CEmtotal}}{\text{Eficiência} \cdot 24 \cdot 354 \cdot (1 - 0,015)} \quad (29)$$

Em que:

1.500.000: capacidade de produção de polpa celulósica, em $\text{t} \cdot \text{a} \cdot \text{ano}^{-1}$;

CEmtotal: consumo específico de madeira total, considerando as perdas na deslignificação com oxigênio, depuração, branqueamento e secagem de celulose, em $\text{m}^3 \cdot \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$;

Eficiência: eficiência operacional da área, em decimal;

24: número de horas de operação por dia;

354: número de dias de operação por ano;

0,015: perdas de 1,5% nos processos de picagem e peneiramento de cavacos (cavacos desclassificados: *overs* e finos).

c- Dimensionamento da área de peneiramento de cavacos, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$:

$$\text{Capacidade} = \frac{1.500.000 \cdot \text{CEmtotal} \cdot \frac{\text{dB}}{\text{dA}}}{\text{Eficiência} \cdot 24 \cdot 354 \cdot (1 - 0,012)} \quad (30)$$

Em que:

1.500.000: capacidade de produção de polpa celulósica, em $\text{t} \cdot \text{a} \cdot \text{ano}^{-1}$;

CEmtotal: consumo específico de madeira total, considerando as perdas na deslignificação com oxigênio, depuração, branqueamento e secagem de celulose, em $\text{m}^3 \cdot \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$;

dB: densidade básica da madeira (cavacos), em $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

dA: densidade aparente dos cavacos, em $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

Eficiência: eficiência operacional da área, em decimal;

24: número de horas de operação por dia;

0,012: perdas de 1,2% no processo de peneiramento de cavacos (cavacos desclassificados: *overs* e finos).

- d- Dimensionamento das áreas de extração de cavacos e alimentação do digestor, $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (volume aparente de cavacos):

$$\text{Capacidade} = \frac{1.500.000 \cdot \text{CEmtotal} \cdot \frac{\text{dB}}{\text{dA}}}{\text{Eficiência} \cdot 24 \cdot 354} \quad (31)$$

Em que:

1.500.000: capacidade de produção de polpa celulósica, em $\text{t}\cdot\text{a}\cdot\text{ano}^{-1}$.

CEmtotal: consumo específico de madeira total, considerando as perdas na deslignificação com oxigênio, depuração, branqueamento e secagem de celulose, em $\text{m}^3\cdot\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$;

dB: densidade básica da madeira (cavacos), em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

dA: densidade aparente dos cavacos, em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$;

Eficiência: eficiência operacional da área, em decimal;

24: número de horas de operação por dia;

354: número de dias de operação por ano.

- e- Dimensionamento da área de evaporação, $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$ (massa de água evaporada):

$$\text{Capacidade} = \frac{1.500.000 \cdot \text{CEmtotal} \cdot \text{dB} \cdot \text{RLM} \cdot (0,8 - \text{SólidosLN})}{\text{Eficiência} \cdot 24 \cdot 354} \quad (32)$$

Em que:

1.500.000: capacidade de produção de polpa celulósica, em $\text{t}\cdot\text{a}\cdot\text{ano}^{-1}$.

CEmtotal: consumo específico de madeira total, considerando as perdas na deslignificação com oxigênio, depuração, branqueamento e secagem de celulose, em $\text{m}^3\cdot\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$;

dB: densidade básica da madeira (cavacos), em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

RLM: relação licor:madeira no cozimento, em $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$;

0,8: concentração de sólidos do licor negro após a evaporação, considerada 80%;

SólidosLN: teor de sólidos do licor negro ao final do cozimento;

Eficiência: eficiência operacional da área, em decimal;

24: número de horas de operação por dia;

354: número de dias de operação por ano.

f- Dimensionamento de queima de sólidos da caldeira de recuperação, $t \cdot dia^{-1}$:

$$Capacidade = \frac{1.500.000 \cdot (tss/tsa + tss/tsa')}{Eficiência \cdot 354} \quad (33)$$

Em que:

1.500.000: capacidade de produção de polpa celulósica, em $t \cdot ano^{-1}$.

tss/tsa: teor de sólidos gerados no cozimento por tonelada de polpa celulósica, em $t \cdot tsa^{-1}$;

tss/tsa': teor de sólidos gerados na deslignificação com oxigênio por tonelada de polpa celulósica, considerando rendimento de 97,5% nesta etapa, em $t \cdot tsa^{-1}$;

Eficiência: eficiência operacional da área, em decimal;

354: número de dias de operação por ano.

g- Dimensionamento da produção de licor branco na área de caustificação:

$$Capacidade = \frac{1.500.000 \cdot CE_{total} \cdot dB \cdot AAA}{Eficiência \cdot 354} \quad (34)$$

Em que:

1.500.000: capacidade de produção de polpa celulósica, em $t \cdot ano^{-1}$.

CE_{total}: consumo específico de madeira total, considerando as perdas na deslignificação com oxigênio, depuração, branqueamento e secagem de celulose, em $m^3 \cdot tsa^{-1}$;

dB: densidade básica da madeira (cavacos), em $g \cdot cm^{-3}$;

AAA: álcali ativo aplicado, em decimal;

Eficiência: eficiência operacional da área, em decimal;

354: número de dias de operação por ano.

A área florestal necessária para abastecer uma fábrica de celulose com capacidade anual de produção de 1.5000.000 toneladas com cada um dos oito materiais genéticos foi calculada de acordo com a Equação 35.

$$Área = \frac{1.500.000 \cdot CE_{total} \cdot Ciclo}{IMA \cdot Ciclo} \quad (35)$$

Em que:

1.500.000: produção anual de celulose, em $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$;

CEmtotal: consumo específico de madeira total, considerando as perdas na deslignificação com oxigênio, depuração, branqueamento e secagem de celulose, em $\text{m}^3 \cdot \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$;

Ciclo: ciclo de corte, considerado como a idade dos materiais analisados neste trabalho, em anos;

IMA: incremento médio anual, em $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$.

3.12 Análise de dados

Os dados obtidos neste trabalho foram analisados conforme descrição abaixo:

- Densidade básica de discos: os resultados de densidade básica dos discos e da casca no sentido longitudinal das árvores foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey a 5% de probabilidade. A análise foi realizada separadamente para os oito materiais genéticos avaliados, sendo que os valores apresentados representam a média aritmética e o coeficiente de variação das 10 repetições das análises de cada ponto das árvores (alturas comerciais). Nos casos em que foi observada variação significativa da densidade básica da madeira ou da casca no sentido longitudinal, foi realizada uma análise de regressão para ajuste da equação que melhor representasse a variação deste parâmetro para cada material genético. Os dados foram plotados em um gráfico, sendo construída uma curva para cada material de acordo com a equação que melhor representou esta variação.

As análises de densidade básica ponderada da madeira, casca e total, além das proporções de casca em massa e volume tiveram seus resultados submetidos à análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey a 5% de probabilidade. Nestes casos, os oito materiais genéticos foram comparados entre si, sendo que cada árvore representou uma repetição.

- Caracterização da madeira, cozimentos, deslignificação com oxigênio, branqueamentos e morfologia das fibras branqueadas: os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey a 5% de probabilidade. Os resultados apresentados representam as médias aritméticas de cada um dos parâmetros. As relações entre parâmetros destes itens foram investigadas a partir de uma análise de regressão para ajuste da equação que melhor representasse essas relações, representadas posteriormente em gráficos.

- **Testes físico-mecânicos:** os resultados apresentados representam as médias aritméticas de cada parâmetro. Foi realizada uma análise de regressão para ajuste da equação que melhor representasse a variação de cada parâmetro em função do número de rotações no refino para cada material genético. Os dados foram plotados em gráficos, sendo construídas curvas para cada material de acordo com as equações que melhor representaram a variação dos parâmetros em função do número de rotações no refino. As relações entre parâmetros destes itens foram investigadas a partir de uma análise de regressão para ajuste da equação que melhor representasse essas relações, representadas em gráficos. Posteriormente, foi realizada uma análise de regressão para ajuste da equação que melhor representasse a variação de cada parâmetro em função do índice de tração das polpas. A partir dessas equações, as propriedades físico-mecânicas das polpas de cada material foram estimadas para um índice de tração fixo de $60 \text{ Nm} \cdot \text{g}^{-1}$.

Em todos os casos foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado. As análises completas são apresentadas no Apêndice D, sendo que as análises de variância e Teste de Tukey foram realizadas utilizando o software Assistat, enquanto que as análises de regressão foram realizadas no software Statgraphics Centurion e os gráficos preparados no software Microsoft Office Excel 2007.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização da madeira

4.1.1 Densidade básica dos discos

A variação longitudinal da densidade básica da madeira dos oito materiais avaliados neste trabalho é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 – Variação longitudinal da densidade básica da madeira

Posição na árvore		URG	CIT 01	CIT 02	TOR	T x C 01	T x C 02	C x T 01	C x T 02
0%	Média, g·cm ⁻³	0,520 a	0,727 a	0,764 a	0,647 a	0,677 a	0,623 a	0,560 a	0,639 a
	C.V., %	3,55	2,52	4,33	4,98	1,75	1,38	3,25	2,57
25%	Média, g·cm ⁻³	0,484 c	0,656 b	0,733 ab	0,592 b	0,635 b	0,601 b	0,533 ab	0,609 b
	C.V., %	3,92	12,57	4,85	2,14	1,19	1,61	2,43	2,83
50%	Média, g·cm ⁻³	0,495 bc	0,654 b	0,715 b	0,571 b	0,630 b	0,592 bc	0,511 b	0,620 ab
	C.V., %	3,55	5,56	5,13	9,12	3,02	2,50	9,65	2,75
75%	Média, g·cm ⁻³	0,507 abc	0,660 b	0,703 b	0,583 b	0,607 c	0,576 c	0,521 b	0,633 a
	C.V., %	3,53	4,95	4,30	4,03	1,63	1,38	3,10	2,53
100%	Média, g·cm ⁻³	0,517 ab	0,656 b	0,691 b	0,554 b	0,576 d	0,549 d	0,524 b	0,626 ab
	C.V., %	4,33	3,72	5,09	3,79	3,01	4,50	2,91	2,78

As médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Dentre os materiais analisados, a madeira de *C. citriodora* com 18 anos de idade (CIT 02) é a mais densa, seguida pelo *C. citriodora* com 8 anos (CIT 01). Já a madeira de *E. grandis* x *E. urophylla*, utilizada como referência neste estudo, apresentou a menor densidade básica. A espécie *C. torelliana* e os híbridos de *C. citriodora* e *C. torelliana* apresentaram madeiras com densidades básicas intermediárias. No presente trabalho, vale ressaltar a variabilidade de materiais utilizados em termos de densidade básica, que variaram entre 0,484 g·cm⁻³ (*E. grandis* x *E. urophylla*, 25% da altura comercial) e 0,764 g·cm⁻³ (*C. citriodora* – CIT 02, base).

As análises de variância para densidade básica da madeira em relação à altura comercial das árvores, cujos resultados são apresentados no Apêndice D, mostram que a variação deste parâmetro é significativa para todos os materiais genéticos avaliados. Desta forma, foi ajustado um modelo matemático para os dados de densidade básica ao longo da altura comercial das árvores de cada material. As equações são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Ajuste de modelo matemático para variação da densidade básica da madeira no sentido longitudinal, em que x: posição na árvore em relação à altura comercial (%); y: densidade básica da madeira (g·cm⁻³)

Material genético	Equação	R ²
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	$y = 1/(2,00561 - 0,000005976 \cdot x^2)$	0,169
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	$y = \sqrt{0,49129 - 0,007384 \cdot \sqrt{x}}$	0,745
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	$y = \sqrt{0,58972 - 0,011066 \cdot \sqrt{x}}$	0,998
<i>C. torelliana</i> - TOR	$y = \sqrt{0,64235 - 0,008615 \cdot \sqrt{x}}$	0,915
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	$y = \exp(-0,39778 - 0,0014729 \cdot x)$	0,954
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	$y = \sqrt{0,38765 - 0,0008163 \cdot \sqrt{x}}$	0,980
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	$y = \sqrt{0,30823 - 0,0044354 \cdot \sqrt{x}}$	0,751
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	$y = \sqrt{0,397445 - 0,00101064 \cdot \sqrt{x}}$	0,074

À exceção de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) e *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02), as equações propostas para a variação de densidade básica no sentido longitudinal das árvores dos diferentes materiais apresentaram valores elevados de coeficiente de determinação (R²). Outras equações testadas também não foram significativas para *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) e *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02), o que demonstra que, apesar de estatisticamente significativa, a variação de densidade básica da madeira destes materiais

genéticos não pode ser representada por um modelo matemático com elevado coeficiente de determinação.

A Figura 16 apresenta a variação longitudinal da densidade básica da madeira, considerando os valores reais de densidade básica e os valores estimados pelas equações apresentadas na Tabela anterior.

Figura 16 – Variação longitudinal da densidade básica da madeira

Todas as espécies e híbridos avaliados possuem densidade básica mais elevada na base, fato também observado por outros autores (DUARTE, 2006; SILVA, 2011). A densidade básica de *C. citriodora* (CIT 02), *C. torelliana* (TOR) e dos híbridos de *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01 e T x C 02) tende a diminuir gradativamente ao longo do fuste. Já no caso do híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla*, observa-se que densidade diminui na altura de 25% e aumenta ao longo do fuste. Alzate, Tomazello Filho e Piedade (2005) observaram um comportamento semelhante neste híbrido, com diminuição da densidade básica até aproximadamente 50% da altura da árvore seguida por aumento de densidade até o topo. Já a espécie *C. citriodora* com 18 anos (CIT 01) e os híbridos de *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01 e C x T 02) apresentaram estabilização da densidade básica a partir da altura de 25%.

A densidade média ponderada da madeira de cada uma dos materiais genéticos também foi calculada, sendo os resultados observados na Tabela 13.

Tabela 13 – Densidade básica ponderada da madeira

Material genético	Densidade básica, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	0,730 a
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	0,668 b
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	0,637 bc
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	0,622 cd
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	0,599 d
<i>C. torelliana</i> – TOR	0,597 d
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	0,533 e
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	0,499 f

As médias seguidas da mesma letra na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Conforme esperado, a madeira de *C. citriodora* (CIT 02) apresenta a maior densidade básica ponderada, enquanto que a madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) é a que apresenta o menor valor para este parâmetro. Os valores de densidade média ponderada dos materiais avaliados neste trabalho estão de acordo com o que é observado na literatura. Utilizando o mesmo método de determinação da densidade básica e cálculo da densidade básica média ponderada, Duarte (2006) encontrou valores entre 0,458 e 0,478 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para diferentes materiais de *E. grandis* x *E. urophylla* com 6 anos de idade, enquanto Alencar (2002) encontrou densidade básica de 0,520 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para o mesmo híbrido com a mesma idade.

A diferença observada entre os materiais de *C. citriodora* se deve principalmente à diferença de idades. O aumento de densidade básica com o aumento da idade é relatado por diversos autores, como Trugilho, Lima e Mendes (1996) e Garcia et al. (2011). Para esta espécie, Brito e Barrichelo (1977) descrevem densidade básica de 0,710 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para a madeira com 8 anos e Sturion et al. (1987) encontraram o valor de 0,715 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para a madeira aos 10,5 anos.

A densidade básica da madeira de *C. torelliana* apresenta valores superiores ao que é relatado na literatura. Esta diferença pode estar relacionada com a idade do material coletado para este estudo, de 15 anos. Santini Junior et al. (2010) encontraram densidade básica de 0,500 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para *C. torelliana* com 8 anos de idade, enquanto Brocco et al. (2012) relatam densidade básica de 0,550 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para esta espécie aos 15 anos.

Dentre os híbridos de *C. citriodora* e *C. torelliana* observa-se variação de densidade básica entre 0,533 e 0,637 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Moutinho (2012) relata valores de aproximadamente 0,600

$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para a madeira de híbridos de *C. torelliana* x *C. citriodora* e *C. citriodora* x *C. torelliana* aos 5 anos de idade.

Em processos de produção de celulose, a densidade básica da madeira é um parâmetro fundamental, influenciando diretamente diferentes etapas de produção, principalmente picagem dos cavacos, impregnação da madeira e cozimento. Além do valor da densidade básica, um fator que deve ser considerado é a homogeneidade da matéria-prima no que diz respeito a este parâmetro. Fábricas que são alimentadas com madeiras com alta variação de densidade básica são mais suscetíveis a distúrbios no processo, o que pode, em casos extremos, acarretar em perdas de produção. Porém, a determinação do grau de homogeneidade da densidade básica da madeira é complexa. Neste trabalho, a opção foi utilizar o Índice de Heterogeneidade (BARRICHELO; BRITO, 1984), cujo objetivo é apresentar a homogeneidade da madeira no sentido longitudinal da árvore, ou seja, no sentido base–topo. A Figura 17 apresenta os valores de Índice de Heterogeneidade para densidade básica da madeira, calculada para os oito materiais avaliados neste trabalho.

Figura 17 – Índice de heterogeneidade

Dentre os materiais analisados, um dos híbridos de *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02) é o que apresenta menor índice de heterogeneidade, ou seja, pode ser considerado como material com densidade básica mais homogênea no sentido longitudinal da árvore. Este material é seguido pelo híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla*, cujo Índice de Heterogeneidade

calculado foi de 0,414. Duarte (2006) encontrou valores de índice de heterogeneidade variáveis entre 0,282 e 0,400 para o mesmo híbrido.

Moutinho (2012), trabalhando com a madeira dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, encontrou valores de Índice de Heterogeneidade de 0,36 para a madeira de *C. torelliana* x *C. citriodora* e 0,11 para a madeira de *C. citriodora* x *C. torelliana*.

As madeiras de *C. torelliana* (TOR), um dos híbridos de *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01) e *C. citriodora* com 8 anos de idade (CIT 01) se destacaram como as mais heterogêneas em relação à densidade básica no sentido longitudinal das árvores. Os demais materiais se localizam em posições intermediárias. De acordo com Duarte (2006), o Índice de Heterogeneidade pode ser considerado um reflexo da intensidade das atividades de melhoramento genético e manejo florestal, as quais podem levar à redução deste índice, garantindo matéria-prima mais homogênea para os processos industriais.

A variação no sentido longitudinal da densidade básica da casca é observada na Tabela 14.

Tabela 14 – Densidade básica da casca nas diferentes posições em relação à altura comercial

Posição na árvore		URG	CIT 01	CIT 02	TOR	T x C 01	T x C 02	C x T 01	C x T 02
0%	Média, g·cm ⁻³	0,258 c	0,316 a	0,400 a	0,378 a	0,362 a	0,382 a	0,322 ab	0,333 b
	C.V., %	4,92	7,16	7,14	6,09	2,22	2,66	1,55	2,78
25%	Média, g·cm ⁻³	0,273 bc	0,300 a	0,372 a	0,356 abc	0,337 b	0,370 a	0,308 b	0,338 ab
	C.V., %	7,99	5,18	7,61	8,60	2,01	2,50	3,18	2,84
50%	Média, g·cm ⁻³	0,278 bc	0,303 a	0,376 a	0,358 ab	0,333 b	0,360 ab	0,310 b	0,347 ab
	C.V., %	4,91	5,74	8,47	16,03	3,06	4,09	3,96	2,87
75%	Média, g·cm ⁻³	0,293 b	0,299 a	0,364 a	0,326 bc	0,337 b	0,344 b	0,314 b	0,352 a
	C.V., %	4,79	4,65	9,33	6,81	4,62	2,78	1,73	4,33
100%	Média, g·cm ⁻³	0,326 a	0,309 a	0,382 a	0,312 c	0,327 b	0,339 b	0,349 a	0,341 ab
	C.V., %	5,48	8,94	16,28	9,88	3,57	9,48	12,93	5,05

As médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Seguindo a tendência observada para a densidade básica da madeira, a espécie *C. citriodora* é a que apresenta casca mais densa, enquanto o híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla* possui a casca com menor densidade, sendo que os valores de densidade básica da casca variaram entre 0,258 e 0,400 g·cm⁻³.

As análises de variância para densidade básica da casca em relação à altura comercial das árvores, cujos resultados são apresentados no Apêndice D, mostram que a variação deste parâmetro é significativa para todos os materiais genéticos avaliados, exceto para as os indivíduos de *C. citriodora* (CIT 01 e CIT 02). Desta forma, foi ajustado um modelo matemático para os dados de densidade básica ao longo da altura comercial das árvores dos seis materiais em que a variação deste parâmetro foi significativa. As equações podem ser observadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Ajuste de modelo matemático para variação da densidade básica da casca no sentido longitudinal, em que x: posição na árvore em relação à altura comercial (%); y: densidade básica da casca

Material genético	Equação	R ²
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	$y = 0,262497 + 0,0000061609 \cdot x^2$	0,968
<i>C. citriodora</i> - CIT 01*	-	-
<i>C. citriodora</i> - CIT 02*	-	-
<i>C. torelliana</i> - TOR	$y = \sqrt{0,142464 - 0,00044116 \cdot x}$	0,930
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	$y = 1/(2,78825 + 0,026282 \cdot \sqrt{x})$	0,873
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	$y = 0,382 - 0,000452 \cdot x$	0,981
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	$y = \sqrt{0,094912 - 0,0000020933 \cdot x^2}$	0,589
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	$y = 1/(2,99781 - 0,01211 \cdot \sqrt{x})$	0,554

*não significativo

Conforme já mencionado, a densidade básica da casca de ambos os materiais *C. citriodora* não apresentou variação significativa ao longo da altura comercial da árvore, sendo que os valores médios deste parâmetro foram 0,304 e 0,378 g·cm⁻³ para CIT 01 e CIT 02, respectivamente.

A Figura 18 apresenta a variação longitudinal da densidade básica da casca, considerando os valores reais de densidade básica e os valores estimados pelas equações.

Figura 18 – Variação da densidade básica da casca no sentido base-topo

Diferentemente do que ocorre na madeira, a densidade básica da casca apresenta comportamento mais homogêneo ao longo do fuste. O comportamento mais marcante foi observado no híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla*, cuja densidade da casca aumenta no sentido base-topo.

Os resultados de densidade ponderada da casca e do teste de comparação de médias (Teste de Tukey) são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Densidade básica ponderada da casca

Material genético	Densidade básica, g cm ⁻³
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	0,377 a
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	0,372 a
<i>C. torelliana</i> – TOR	0,356 b
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	0,344 b
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	0,338 b
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	0,314 c
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	0,304 c
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	0,276 d

As médias seguidas da mesma letra na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

As cascas de ambos os materiais de *C. citriodora* apresentam as maiores densidades básicas ponderadas dentre os materiais avaliados neste trabalho, enquanto que o menor valor para este parâmetro foi observado para o híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*.

O teor de casca em volume no sentido base-topo das árvores é observada na Figura 19.

Figura 19 – Teor de casca em volume no sentido longitudinal

Em relação ao teor de casca em volume na árvore, os híbridos de *C. citriodora* e *C. torelliana* apresentam comportamentos semelhantes entre si. Nesses materiais, o volume de casca na base tende a ser alto, havendo grande redução na altura de 25%. Entre este ponto e o topo da árvore, há uma maior homogeneidade no volume proporcional de casca, sendo observado um pequeno aumento. Os demais materiais não apresentam comportamento definido, sendo constante a proporção de casca em volume nas árvores amostradas.

A Tabela 17 apresenta os resultados de proporção de casca em volume e em massa nas árvores dos oito materiais analisados, incluindo o teste de comparação de médias (Teste de Tukey).

Tabela 17 – Teores de casca médios em volume e massa

Material genético	Casca em volume,		Casca em massa,	
	%		%	
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	10,0	d	5,8	e
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	17,3	c	8,8	d
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	21,7	b	12,7	c
<i>C. torelliana</i> – TOR	13,4	cd	8,4	de
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	23,2	b	14,1	bc
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	23,1	b	15,8	ab
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	27,4	a	18,2	a
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	24,2	ab	14,8	bc

As médias seguidas da mesma letra na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Os quatro híbridos de *C. citriodora* e *C. torelliana* se destacaram por apresentarem maior proporção de casca nas árvores. Dentre os materiais, há destaque para o híbrido *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01), cuja proporção de casca em volume na árvore chega a 27,4%. Já o material de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) apresenta a menor proporção de casca em volume (10,0%), valor que está de acordo com o que é descrito em literatura (DUARTE, 2006; MIRANDA, 2000; OLIVEIRA et al., 1999).

A proporção de casca em massa nas árvores segue a mesma tendência da proporção em volume, com destaque para os quatro híbridos de *C. citriodora* e *C. torelliana*, que apresentam as maiores proporções de casca em massa. Por outro lado, a madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* é a que apresenta menor proporção de casca em massa.

O estudo da casca das árvores destinadas à produção de celulose é importante, pois a casca é um dos principais resíduos desta indústria, não sendo aproveitada para a produção de celulose. A destinação final da casca em indústrias de celulose depende basicamente do local de descascamento das árvores, da matriz energética utilizada na fábrica e da gestão de resíduos sólidos da empresa. Há quatro principais destinações para a casca em indústrias de celulose: cobertura e proteção do solo nos plantios florestais, extração de taninos, geração de vapor na caldeira de biomassa e compostagem (FOELKEL, 2005; MIRANDA, 2000; SEIXAS; BAUCH; OLIVEIRA JR., 2005).

A Tabela 18 apresenta os resultados de densidade básica total, incluindo madeira e casca, bem como o respectivo teste de comparação de médias (Teste de Tukey).

Tabela 18 – Densidade básica ponderada total (madeira e casca)

Material genético	Densidade básica, g cm⁻³
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	0,655 a
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	0,606 b
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	0,569 c
<i>C. torelliana</i> – TOR	0,564 c
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	0,553 c
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	0,547 c
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	0,477 d
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	0,472 d

As médias seguidas da mesma letra na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

A densidade básica ponderada total foi calculada a partir das densidades básicas da madeira e da casca em cada disco amostrado. Assim, o cálculo da densidade total de cada altura considerou a proporção de casca em cada porção da árvore, enquanto que a densidade básica ponderada total foi calculada a partir das densidades e dos diâmetros dos discos com casca em cada das alturas consideradas.

Seguindo a tendência observada para as análises da madeira e da casca, a espécie *C. citriodora* (CIT 02) apresenta a maior densidade básica ponderada total. Já os materiais de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) e *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01) apresentam as menores densidades básicas ponderadas totais.

Os resultados de densidade básica total, da madeira e da casca, além das proporções de casca em massa e volume são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Proporção de casca e médias ponderadas de densidade básica total, densidade básica da madeira e densidade básica da casca

Componente		URG	CIT 01	CIT 02	TOR	T x C 01	T x C 02	C x T 01	C x T 02
Densidade básica total	Média, g·cm ⁻³	0,477	0,606	0,655	0,564	0,569	0,547	0,472	0,553
	C.V., %	4,4	7,4	4,9	8,6	4,7	4,7	6,1	3,8
Densidade básica da madeira	Média, g·cm ⁻³	0,499	0,668	0,730	0,597	0,637	0,599	0,533	0,622
	C.V., %	5,2	8,0	5,8	8,2	5,8	4,9	7,3	3,3
Densidade básica da casca	Média, g·cm ⁻³	0,276	0,304	0,377	0,356	0,344	0,372	0,314	0,338
	C.V., %	10,7	7,2	11,1	12,5	5,1	6,6	8,6	4,4
Teor de casca em massa, %	Média, %	5,8	8,8	12,7	8,4	14,1	15,8	18,2	14,8
Teor de casca em volume, %	Média, %	10,0	17,3	21,7	13,4	23,2	23,1	27,4	24,2

4.1.2 Densidade básica dos cavacos

Os resultados de densidade básica dos cavacos, determinada de acordo com o método do Máximo Teor de Umidade, bem como do teste de comparação de médias (Teste de Tukey) são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Densidade básica dos cavacos

Material genético	Densidade básica, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	0,616 a
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	0,568 b
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	0,547 c
<i>C. torelliana</i> - TOR	0,534 cd
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	0,525 de
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	0,517 e
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	0,468 f
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	0,451 g

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Os resultados de densidade básica dos cavacos seguem os resultados observados para a densidade básica dos discos, ou seja, os materiais da espécie *C. citriodora* são os que apresentam maior densidade básica dentre os materiais avaliados. Já o híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* é o que apresenta madeira com menor densidade básica neste trabalho.

Utilizando também o método do Máximo Teor de Umidade, Foelkel, Barrichelo e Milanez (1975) encontraram valores de 0,738 e 0,637 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para a madeira da espécie *C. citriodora* com 13 e 7 anos de idade, respectivamente, enquanto Segura e Silva Jr. (2010) relatam densidade básica de 0,654 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para a madeira desta espécie com 7 anos de idade.

A madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* utilizada neste trabalho apresentou densidade básica próxima ao que foi relatado por Vivian (2015), de 0,447 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, e Schmidt (2014), de 0,444 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Já Gomide et al. (2005) encontraram valores que variam entre 0,472 e 0,510 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para este híbrido, enquanto Segura (2012) e Bonfatti Júnior (2014) relatam densidade básica de 0,469 e 0,501 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, respectivamente.

É possível observar que há grande variação na densidade básica dos cavacos dos diferentes híbridos de *C. citriodora* e *C. torelliana*. Dentre estas madeiras, a de *C. torelliana* x

C. citriodora (T x C 01) é a mais densa, enquanto uma das madeiras de *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01) apresenta a menor densidade básica.

A Figura 20 apresenta a relação entre a densidade básica de discos, determinada pelo método da Balança Hidrostática, e a densidade básica de cavacos, determinada pelo método do Máximo Teor de Umidade.

Figura 20 – Relação entre densidade básica de cavacos e densidade básica de discos

Conforme esperado, há forte relação entre a densidade básica dos discos e a densidade básica dos cavacos, parâmetros determinados por métodos diferentes neste trabalho. A densidade básica dos cavacos se manteve em valores inferiores à densidade básica dos discos em todos os materiais analisados. É importante ressaltar que a diferença de resultados observada para os dois métodos é justificada pelas diferenças de amostragem e métodos utilizados nas análises.

O incremento médio anual mássico também foi calculado e é apresentado na Figura 21. Este parâmetro indica a massa de madeira produzida anualmente por hectare, estando relacionado com o incremento médio anual (volumétrico) e a densidade básica da madeira. Desta forma, foi possível calcular este parâmetro apenas para os 6 materiais genéticos cujos dados de IMA (Incremento Médio Anual) estavam disponíveis.

Figura 21 – Incremento médio anual mássico de madeira (sem casca)

Os resultados do incremento médio anual mássico mostram que o híbrido *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02) é a que apresenta maior produção mássica anual de madeira por hectare. Esse fato está diretamente relacionado aos níveis de crescimento (IMA) deste material, superior aos demais. A madeira de *C. citriodora*, por apresentar maior densidade básica, também possui alto IMA mássico, enquanto o híbrido *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01) apresenta o menor valor para este parâmetro, seguindo os baixos níveis de crescimento observados para este material.

4.1.3 Densidade aparente de cavacos

A densidade aparente, ou densidade a granel, é um parâmetro bastante direto e simples para a indústria de celulose e se relaciona com a capacidade de produção de uma fábrica (SEGURA, 2012). Esse parâmetro está diretamente relacionado à capacidade de estocagem, peneiramento e extração de cavacos, além da alimentação do digestor. Também é importante ressaltar que, em uma fábrica de polpa celulósica, a madeira é adquirida em volume e a produção contabilizada pela massa de celulose produzida. Os resultados da densidade aparente dos cavacos e do teste de comparação de médias (Teste de Tukey) podem ser observados na Tabela 21.

Tabela 21 – Densidade aparente dos cavacos

Material genético	Densidade aparente, g·cm⁻³
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	0,213 a
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	0,195 b
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	0,188 bc
<i>C. torelliana</i> – TOR	0,183 cd
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	0,179 de
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	0,173 e
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	0,164 f
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	0,154 g

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Os resultados de densidade aparente dos cavacos seguem os resultados de densidade básica, ou seja, as madeiras de *C. citriodora* são as que apresentam maior densidade aparente, enquanto os cavacos do híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* são os que possuem o menor valor para este parâmetro. O resultado de densidade aparente encontrado para a madeira do híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) é coerente com o que é relatado por outros autores. Longue Júnior e Colodette (2011) e Schmidt (2014), trabalhando com cavacos da madeira do híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* com 7 anos de idade, observaram valores médios de 0,193 e 0,141 g.cm⁻³, respectivamente, para este parâmetro. Já Segura (2012) e Bonfatti Júnior (2014) encontraram valores médios de 0,201 e 0,183 g.cm⁻³ para a madeira de híbridos das mesmas espécies com 6 anos de idade, enquanto Vivian (2015) relata densidade aparente de 0,167 g.cm⁻³ para esta madeira aos cinco anos de idade. É importante ressaltar que, no presente trabalho, a análise de densidade aparente foi realizada nos cavacos classificados, ou seja, os cavacos de todos os materiais genéticos se encontravam na mesma faixa de espessura. Assim, pode-se afirmar que as diferenças de densidade aparente observadas para os diferentes materiais refletem as diferenças de densidade básica, uma vez que não houve influência da granulometria dos cavacos.

A Figura 22 apresenta a relação entre densidade aparente e a densidade básica dos cavacos.

Figura 22 – Relação entre densidade aparente e densidade básica de cavacos

Como pode ser observado na Figura anterior, há relação entre densidade aparente e densidade básica de cavacos. No presente trabalho, os valores de densidade básica dos cavacos foram de 2,85 a 2,99 vezes maiores que os valores encontrados para a densidade aparente de cavacos.

4.1.4 Composição química

A Tabela 22 apresenta a composição química das diferentes madeiras analisadas neste trabalho.

Tabela 22 – Composição química da madeira

Componente	URG	CIT 01	CIT 02	TOR	T x C 01	T x C 02	C x T 01	C x T 02
Extrativos totais, %	5,64	4,67	8,92	8,66	3,68	9,81	2,54	2,38
Lignina Klason, %	24,86	19,10	21,91	18,87	19,58	18,21	19,96	17,91
Lignina solúvel, %	2,23	3,18	2,77	3,83	2,80	2,74	2,93	2,45
Lignina total, %	27,09	22,29	24,68	22,71	22,37	20,95	22,89	20,35
Cinzas, %	0,24	0,45	0,28	0,75	0,50	0,46	0,69	0,49
Holocelulose, %	67,27	73,05	66,40	68,63	73,95	69,24	74,57	77,27

Em processos de polpação, a composição química da madeira afeta diretamente os rendimentos em celulose, o consumo de álcali e a qualidade da polpa celulósica produzida. Segundo Silva (2011), a composição química da madeira é bastante complexa e varia entre espécies, entre árvores da mesma espécie e ainda entre diferentes posições de uma mesma árvore. De acordo com Segura (2012), dentre os principais componentes químicos da madeira, a lignina e os extrativos são considerados indesejáveis ao processo de polpação e seus teores influenciam o rendimento em celulose e o consumo de reagentes. Altos teores de extrativos influenciam negativamente na produção de celulose, podendo gerar depósitos conhecidos como “pitch” nas máquinas de secagem e sujidade da folha de celulose produzida.

Os resultados da análise de extrativos totais da madeira dos materiais analisados e de seu respectivo teste de comparação de médias (Teste de Tukey) são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Teor de extrativos totais

Material genético	Extrativos totais, %	
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	9,81	a
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	8,92	ab
<i>C. torelliana</i> – TOR	8,66	b
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	5,64	c
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	4,67	cd
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	3,68	d
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	2,54	e
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	2,38	e

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Dentre os materiais analisados, três apresentam alto teor de extrativos: o híbrido *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 02), além das madeiras de *C. citriodora* (CIT 02) e *C. torelliana* (TOR). As madeiras com os menores teores de extrativos são os híbridos de *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01 e C x T 02). Já as madeiras de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG), *C. citriodora* (CIT 01) e *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01) possuem teores intermediários destes componentes.

No caso dos materiais puros de *C. citriodora*, é possível observar a influência do fator idade no aumento do teor de extrativos da madeira. Severo et al. (2013) encontrou um teor de extrativos de 7,3% para a madeira desta espécie com 32 anos, enquanto Costa et al. (1997),

trabalhando com a madeira de *C. citriodora* com 10 anos, reporta um valor de 5,68% para estes componentes.

Os valores de extrativos totais encontrados para a madeira de referência deste trabalho (*E. grandis* x *E. urophylla*) são superiores aos valores descritos em literatura. Utilizando os mesmos métodos de quantificação dos extrativos, Duarte (2006) encontrou valores de extrativos totais variando entre 2,30 e 3,98 % para a madeira deste híbrido com idades de 5 a 6 anos. Segura (2012) indica um teor de extrativos de 3,06% para esta madeira com 6 anos de idade, enquanto Vivian (2015) encontrou 2,63% de extrativos para este material com 5 anos. Os resultados encontrados neste trabalho estão mais próximos aos descritos por Schmidt (2014), que indica um teor de extrativos de 4,46% na madeira deste híbrido com 7 anos.

Os resultados resumidos do teor de lignina total da madeira dos materiais analisados e do teste de comparação de médias (Teste de Tukey) destes dados são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Teor de lignina total – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)

Material genético	Lignina Total, %	
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	27,09	a
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	24,68	ab
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	22,89	bc
<i>C. torelliana</i> – TOR	22,71	bc
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	22,37	bc
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	22,29	bc
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	20,95	bc
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	20,35	c

As médias seguidas da mesma letra na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Os híbridos *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02) e *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 02) se destacam por apresentar os menores teores de lignina dentre os materiais analisados. A madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) é a que possui maior teor de lignina, enquanto os demais materiais apresentam teores relativamente baixos. Como a remoção de lignina é um dos principais objetivos dos processos de polpação, baixos teores deste componente favorecem a deslignificação, permitindo que as condições de cozimento sejam mais brandas e, conseqüentemente, a qualidade da polpa produzida seja superior a de polpas produzidas a partir de madeiras com alta proporção de lignina.

O baixo teor de lignina em espécies do gênero *Corymbia* é relatado por diversos autores. Severo et al. (2013), utilizando a madeira de *C. citriodora* com 32 anos de idade encontrou um teor de lignina klason variável entre 20,7 e 23,7%. Já Foelkel; Barrichelo e Milanez (1975) reportam teores de lignina de 15,3 e 17,8% na madeira de *C. citriodora* aos 7 e aos 13 anos, respectivamente. Costa et al. (1997) encontraram um teor de lignina de 18,8% na madeira da mesma espécie aos 10 anos, enquanto Barrichelo e Brito (1976) encontraram um teor de lignina de 22,0% para a madeira de *C. torelliana* aos 4 anos de idade. Os teores de lignina do híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla* estão de acordo com o que é citado por outros autores (GOMIDE et al., 2005; BONFATTI JR., 2014; VIVIAN, 2015).

De acordo com Silva (2011), o termo “holocelulose” é comumente utilizado para descrever o total de carboidratos presentes na madeira. Um alto teor deste componente afeta positivamente o rendimento dos processos de polpação. No presente trabalho, o maior teor de holocelulose foi encontrado para a madeira do híbrido *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02). As madeiras de *C. citriodora* (CIT 01), *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01) e *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01) também apresentam proporção de holocelulose maior que 70%. Já a madeira de *C. citriodora* (CIT 02) é a que apresenta a menor proporção de holocelulose, fato diretamente relacionado aos mais altos teores de extrativos e lignina deste material.

Com base nos resultados deste trabalho, foi investigada a correlação entre a densidade básica e a composição química da madeira. Porém, não foi observada qualquer relação entre esses parâmetros da madeira, confirmando os resultados obtidos por Shimoyama e Barrichelo (1991).

Assim como os extrativos, os compostos inorgânicos também são considerados constituintes estranhos da madeira, sendo representados pelo teor de cinzas. Estes componentes são geralmente constituídos pelos íons cálcio, manganês, ferro, magnésio, cobre, alumínio, potássio e sódio, sendo encontrados na forma de silicatos, carbonatos, fosfatos e sulfatos (COSTA et al., 1997). Os resultados do teor de cinzas da madeira dos materiais analisados e do teste de comparação de médias (Teste de Tukey) destes dados são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Teor de cinzas – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)

Material genético	Cinzas, %
<i>C. torelliana</i> – TOR	0,75 a
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	0,69 a
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	0,50 b
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	0,49 b
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	0,46 b
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	0,45 b
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	0,28 c
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	0,24 c

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Dentre os materiais analisados, *C. torelliana* (TOR) e um dos híbridos de *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01) são os materiais que apresentaram maior teor de cinzas na madeira. Já o híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) e a madeira de *C. citriodora* com 18 anos (CIT 02) são as que apresentam menores teores de cinzas na madeira.

De acordo com Fengel e Wegener (1989), o teor de cinzas das madeiras está em torno de 0,5%. Já Brito e Barrichelo (1977) encontraram teor de cinzas de 1,0% para a madeira de *C. citriodora*, enquanto Segura (2012) descreve um teor de cinzas de 0,45% para a madeira de *E. grandis* x *E. urophylla*. Barrichelo e Brito (1976) estudaram a espécie *C. torelliana*, tendo encontrado 1,0% de cinzas em sua madeira.

Por apresentar os menores teores de extrativos e lignina e o maior teor de holocelulose, a madeira do híbrido *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02) é a que apresenta as melhores características químicas para processos de polpação. Já a madeira de *C. citriodora* (CIT 02) é a que possui as piores características químicas para a produção de celulose, possuindo alto teor de extrativos, o menor teor de holocelulose e o segundo maior teor de lignina. No caso deste material, o fator idade pode ser um dos responsáveis por suas características químicas desfavoráveis para processos de polpação.

4.1.5 Morfologia das fibras

De acordo com Silva (2011), as dimensões das fibras são parâmetros importantes para produção de polpa celulósica, visto que as propriedades físico-mecânicas da polpa são em grande parte determinadas pelas características das fibras, sendo suas principais dimensões comprimento, largura, espessura de parede e diâmetro do lume (SIVA JR.; MUNER; VALLE, 1995). Os resultados de morfologia das fibras são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Caracterização morfológica das fibras

Material genético	C (mm)		L (µm)		DL (µm)		E (µm)		FP (%)
URG	1,02	e	19,8	a	12,7	a	3,5	e	36
CIT 01	1,07	cd	16,1	d	5,4	e	5,3	b	66
CIT 02	1,06	d	15,0	e	4,2	f	5,4	b	72
TOR	1,12	ab	18,0	b	8,6	b	4,7	d	52
T x C 01	1,12	a	17,0	c	5,5	e	5,7	a	68
T x C 02	1,09	abcd	17,4	bc	7,3	c	5,0	c	58
C x T 01	1,08	bcd	17,3	bc	8,2	b	4,6	d	53
C x T 02	1,11	abc	17,3	bc	6,6	d	5,4	b	62

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

C: comprimento das fibras, L: largura das fibras, DL: diâmetro do lume, E: espessura de parede e FP: fração parede

É possível observar que todos os materiais avaliados de *C. citriodora*, *C. torelliana* e seus híbridos apresentam, em comparação ao material de referência (*E. grandis* x *E. urophylla*), as seguintes características morfológicas das fibras: maior comprimento, menor largura, menor diâmetro do lume, maior espessura de parede e, conseqüentemente, maior fração parede.

Os materiais de *C. torelliana*, os híbridos de *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01 e T x C 02) e um dos híbridos de *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02) se destacam por apresentarem os maiores comprimentos de fibras, enquanto ambas as madeiras de *C. citriodora* são as que apresentam as menores larguras das fibras e menores diâmetros do lume.

A maior espessura de parede foi encontrada para o híbrido *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01). A Figura 23 relaciona a fração parede das fibras com a densidade básica de cavacos.

Figura 23 – Relação entre fração parede das fibras da madeira e densidade básica de cavacos

A Figura acima confirma a relação entre a fração parede das fibras e a densidade básica da madeira. No presente trabalho, os materiais mais densos são os que apresentaram maior fração parede, relação também relatada por Silva (2011) e Segura (2012).

A variabilidade observada na morfologia das fibras das madeiras avaliadas neste trabalho permite inferir que as polpas celulósicas produzidas com estes materiais irão apresentar propriedades físicas e mecânicas distintas entre si, com destaque para as diferenças morfológicas dos materiais de *Corymbia* em relação ao material de referência (*E. grandis* x *E. urophylla*). Essas variações podem indicar estas polpas para a produção de diferentes tipos de papéis.

Os resultados encontrados para a morfologia das fibras estão de acordo com o que é descrito por diferentes autores. Para a madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* com 6 anos, Segura (2012) descreve fibras com comprimento de 1,04 mm, largura de 20,83 µm, diâmetro do lume de 13,41 µm, espessura de parede de 3,71 µm e fração parede de 36%. Já Schmidt (2015), avaliando a madeira deste híbrido com 7 anos, encontrou valores de 1,06 mm, 20,04 µm, 13,82 µm, 3,11 µm e 31% para estes parâmetros, respectivamente.

Estudando a madeira de *C. citriodora* com 7 anos, Foelkel, Barrichelo e Milanez (1975) descrevem fibras com 0,915 mm de comprimento, 15,50 µm de largura, 4,75 µm de diâmetro

do lume e 5,37 μm de espessura de parede, que equivalem a fração parede de 69%. Para a madeira da mesma espécie com 13 anos, os valores encontrados para estes parâmetros foram 0,943 mm, 15,89 μm , 4,41 μm , 5,74 μm e 72%, respectivamente. Com base nestes resultados, observa-se influência da idade na fração parede da madeira de *C. citriodora*, fato também observado no presente trabalho, já que a fração parede é maior na madeira com 18 anos em comparação à madeira da mesma espécie com 8 anos.

Barrichelo e Brito (1976) avaliaram as fibras da madeira de *C. torelliana* com 4 anos de idade. Os autores encontraram comprimento de 0,81 mm, largura de 17,2 μm , diâmetro do lume de 7,8 μm , espessura de parede de 4,7 μm e fração parede de 55%. Estes resultados estão consoantes aos encontrados neste trabalho, diferindo apenas no comprimento das fibras, o que pode ser explicado pela diferença de idade e diferença de materiais genéticos das madeiras avaliadas.

4.2 Cozimentos

Os resultados dos cozimentos são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Resultados dos cozimentos

Parâmetro	URG	CIT 01	CIT 02	TOR	T x C 01	T x C 02	C x T 01	C x T 02
Número kappa	18,5	18,0	18,8	18,8	18,5	18,8	18,7	17,9
Álcali Ativo (base NaOH), %	20,0	19,0	22,0	22,5	25,0	23,5	22,0	22,0
Álcali Efetivo (base NaOH), %	16,8	16,0	18,5	18,9	21,0	19,7	18,5	18,5
Temperatura máxima, °C	155	153	158	160	165	160	157	158
Fator H	1.007	874	1.291	1.520	2.299	1.560	1.130	1.300
Rendimento Bruto, %	54,0	54,1	49,5	50,5	46,5	48,0	50,6	51,7
Teor de Rejeitos, %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Rendimento Depurado, %	54,0	54,1	49,5	50,5	46,5	48,0	50,6	51,7
Ácidos Hexenurônicos, $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$	49,5	53,2	51,5	68,9	60,0	61,4	59,1	49,1
Número kappa corrigido	14,3	13,4	14,4	12,9	13,3	13,5	13,6	13,6
Alvura, % ISO	34,6	33,5	26,2	26,7	23,0	25,8	28,1	27,3
Viscosidade, $\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$	1.341	1.273	1.287	1.230	1.180	1.302	1.296	1.427
Seletividade, Viscosidade/#kappa	72,3	70,6	68,3	65,3	63,9	69,3	69,3	80,0
Consumo específico de madeira, $\text{m}^3\cdot\text{tsa}^{-1}$	3,70	2,93	2,95	3,34	3,54	3,63	3,80	3,32
Sólidos Gerados, t/tsa	1,10	1,08	1,32	1,28	1,52	1,41	1,27	1,23

4.2.1 Análises da polpa

É possível observar que os oito materiais se comportam de maneiras distintas frente ao processo kraft de polpação. Essa variabilidade de comportamento se deve, sobretudo, às diferentes características das madeiras avaliadas e já discutidas nos itens anteriores deste trabalho. Nesse sentido, destacam-se a variabilidade de composição química e densidade básica dos materiais, fatores que exercem influência no processo de cozimento da madeira (WALLIS; WEARNE; WRIGHT, 1996; ALMEIDA; SILVA JR., 2004).

Dentre os materiais avaliados, a madeira de *C. citriodora* com 8 anos (CIT 01) foi a que demandou menor carga alcalina e menor temperatura para atingir o número kappa de $18 \pm 0,9$. Já para a madeira do híbrido *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01), observa-se as condições mais agressivas de cozimento em relação à aplicação de álcali ativo e temperatura. O material híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*, referência tecnológica para a produção de polpa celulósica, foi o que demandou a segunda condição de cozimento mais branda – é importante ressaltar que os tempos de cozimento foram mantidos constantes para todos os materiais genéticos avaliados.

Em um estudo com a madeira de *E. grandis* x *E. urophylla*, Segura (2012) utilizou temperatura máxima de 151°C e álcali ativo de 17,5%, sendo as demais condições de cozimento semelhantes às empregadas no presente trabalho. O autor descreve número kappa de 17,7, rendimento depurado de 56,1%, teor de ácidos hexenurônicos de $45,8 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ e viscosidade de $1.317 \text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$. As diferenças nas condições do ensaio e nos resultados do cozimento do trabalho citado em relação ao presente estudo podem ser justificadas pelas diferenças das características da madeira, que no estudo de Segura (2012) apresentava menor teor de extrativos (3,06%), maior teor de holocelulose (68,85%) e maior densidade básica ($0,469 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) em comparação à madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* utilizada neste trabalho.

O fator H é uma variável desenvolvida para expressar tempo e temperatura do cozimento (KLEPPE, 1970). Em termos teóricos, independente de temperatura e tempo adotados, uma mesma matéria-prima, sob diferentes condições de cozimento, deve resultar em graus de deslignificação semelhantes quando o fator H é mantido constante. Desta forma, como os tempos de cozimento são constantes para todos os materiais, o fator H acompanha a temperatura máxima de cozimento, ou seja, é maior para o híbrido de *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01) e menor para a madeira de *C. citriodora* (CIT 01).

As condições de cozimento exercem influência direta sobre os rendimentos do processo de polpação (ALMEIDA, 2003; SEGURA; ZANÃO; SILVA JR., 2010). Essa tendência é observada também neste trabalho, sendo que os maiores rendimentos foram observados para a madeira de *C. citriodora* (CIT 01) e *E. grandis* x *E. urophylla* (URG). Já a madeira de *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01), cujas condições de cozimento foram as mais agressivas, apresenta os menores rendimentos.

Os cozimentos de todos os materiais avaliados neste trabalho não apresentaram rejeitos. De acordo com Foelkel (2009), uma boa impregnação favorece, entre outros pontos, uma diminuição no teor de rejeitos. Além disso, alguns autores relatam dificuldade de impregnação em madeiras de alta densidade (JACOB; BALLONI, 1978; BARRICHELO, 1983; QUEIROZ et al., 2004). Já Almeida (2003) afirma que valores elevados de densidade básica da madeira, alto teores de lignina e extrativos podem diminuir a eficiência das reações de deslignificação, originando materiais parcialmente cozidos, que são classificados como rejeitos do processo de polpação. Porém, no presente trabalho, não foram observadas dificuldades de impregnação ou de deslignificação, inclusive nas madeiras mais densas. A ausência de rejeitos indica que as condições de vaporização e impregnação utilizadas são suficientes para impregnar os cavacos de madeiras de alta densidade.

Almeida (2003) discutiu a influência da densidade básica da madeira no processo Lo-Solids[®] de polpação. O autor concluiu que este processo é menos sensível à variação da densidade básica devido, principalmente, à boa eficiência da fase de impregnação. Contudo, vale ressaltar que o autor utilizou apenas dois clones de *Eucalyptus*, com variação de densidade básica de 0,499 a 0,559 g·cm⁻³, menor que a variação de densidade básica observada no presente trabalho.

Os resultados de rendimento depurado e do teste de comparação de médias (Teste de Tukey) destes dados são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Rendimento depurado – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)

Material genético	Rendimento depurado, %
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	54,1 a
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	54,0 ab
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	51,7 bc
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	50,6 c
<i>C. torelliana</i> – TOR	50,5 c
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	49,5 cd
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	48,0 de
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	46,5 e

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Como pode ser observado na Tabela anterior, os maiores rendimentos depurados foram encontrados para as madeiras de *C. citriodora* com 8 anos (CIT 01) e *E. grandis* x *E. urophylla* (URG). Por outro lado, os híbridos de *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01 e T x C 02) apresentam os rendimentos mais baixos encontrados neste trabalho. Em um estudo com a madeira de *C. citriodora* com densidade básica de $0,637 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, Gardner, Little e Arbuthnot (2007) encontraram rendimento depurado de 54,3% e consumo específico de madeira de $2,89 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$. Porém, o número kappa descrito pelos autores é de 29,4, bastante superior ao número kappa utilizado no presente trabalho, dificultando a comparação dos resultados, uma vez que há relação direta entre rendimento depurado e número kappa da polpa. Carvalho (1999), Almeida (2003), Segura e Silva Jr. (2010) e Segura (2012) demonstram que, considerando a mesma matéria-prima, a redução do número kappa das polpas no processo de polpação provoca redução do rendimento em polpa celulósica. Isso se justifica pelo fato de o processo de cozimento não ser completamente seletivo, ou seja, durante a polpação, além das reações de deslignificação também são observadas reações de degradação dos carboidratos, prejudicando assim o rendimento do processo.

O consumo específico de madeira é calculado com base na densidade básica do material e no rendimento do processo de polpação. De acordo com Queiroz et al. (2004), o consumo específico de madeira diminui com o aumento da densidade básica da madeira, tendência também citada por outros autores (MOKFIENSKI et al., 2008; FERNANDES et al., 2011; FANTUZZI NETO, 2012). Neste trabalho, esse fato também foi observado, uma vez que as madeiras de *C. citriodora*, as mais densas dentre as avaliadas, são as que apresentam menor consumo específico de madeira, enquanto o híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*, material com

menor densidade básica, foi o que apresentou o maior consumo de madeira. É importante ressaltar que os valores de consumo específico de madeira apresentados na Tabela 21 representam o consumo de madeira para a produção de polpa marrom, contabilizando apenas os rendimentos do processo de polpação e desconsiderando as perdas nos processos subsequentes de deslignificação com oxigênio, branqueamento e secagem.

Em fábricas de celulose, a importância do rendimento gravimétrico do processo de polpação, que é a relação entre massa seca de celulose produzida e massa seca de madeira, deve ser relativizada. Na realidade, o consumo específico de madeira é o indicador mais apropriado, uma vez que, como já mencionado, a madeira é normalmente adquirida em volume e a polpa celulósica comercializada em massa. Desta forma, quanto maior a produção mássica de polpa por unidade de volume de madeira, melhor é o resultado do cozimento.

Com base nos resultados deste trabalho, foi investigada a relação do consumo específico de madeira com a densidade básica dos cavacos e com o rendimento depurado do processo de polpação. Os resultados são apresentados na Figura 24.

Figura 24 – Relação entre consumo específico de madeira, densidade básica e rendimento depurado dos cozimentos

Observa-se na Figura anterior que, no presente trabalho, o consumo específico de madeira é mais dependente da densidade básica dos cavacos do que do rendimento depurado. Esse fato ocorre uma vez que não foi observada influência direta da densidade básica da madeira nos rendimentos do processo de polpação. Assim, uma redução no consumo

específico de madeira é mais facilmente atingida com o aumento da densidade básica da madeira do que com o aumento no rendimento do cozimento. Apesar disso, deve-se considerar que a variação de densidade básica entre o material mais denso e o menos denso foi de 36,6% (de 0,451 a 0,616 g·cm⁻³), enquanto que a variação entre o maior e o menor rendimento depurado foi de 16,3% (46,5 a 54,1%), ou seja, por ser uma relação matemática, o consumo específico de madeira foi mais influenciado pela variável com maior oscilação.

Durante a polpação alcalina, pela modificação de ácidos 4-O metilglucurônicos, presentes nas xilanas, são formados os ácidos hexenurônicos. Essa formação é influenciada pelas condições de cozimento, principalmente álcali aplicado, sulfidez e temperatura. Estes compostos protegem as xilanas contra a despolimerização terminal, preservando o rendimento do processo de polpação (COSTA; MOUNTEER; COLODETTE, 2001). Porém, a presença deles na polpa não é desejável nos processos de branqueamento, uma vez que consomem reagentes químicos e causam maior reversão de alvura (VENTORIM et al., 2006). Os resultados de ácidos hexenurônicos nas polpas marrons e do teste de comparação de médias (Teste de Tukey) destes dados são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Teor de ácidos hexenurônicos – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)

Material genético	Ácidos Hexenurônicos, μmol·g ⁻¹
<i>C. torelliana</i> – TOR	68,9 a
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	61,4 ab
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	60,0 ab
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	59,1 ab
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	53,2 ab
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	51,5 ab
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	49,5 b
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	49,1 b

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

A polpa de *C. torelliana* (TOR) é a que apresenta maior proporção de ácidos hexenurônicos, enquanto as polpas dos híbridos *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) e *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02) são as que apresentam as menores quantidades destes compostos. Em condições semelhantes de cozimento, Segura (2012) encontrou um valor de 45,8 μmol·g⁻¹ para o teor de ácidos hexenurônicos em polpa de *E. grandis* x *E. urophylla* com número kappa 18. As diferenças nos teores de ácidos hexenurônicos se devem às diferenças

químicas entre as madeiras e também às distintas condições de cozimento empregadas neste trabalho.

O teor de ácidos hexenurônicos da polpa marrom influencia diretamente o cálculo do número kappa corrigido. Este parâmetro deve ser entendido como a fração do número kappa que se deve à presença de lignina. Para seu cálculo, deve-se descontar do número kappa a participação dos ácidos hexenurônicos que, de acordo com Li e Gellerstedt (1997), é de 1 unidade de kappa para cada $11,6 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ de ácidos hexenurônicos. A Figura 25 apresenta o número kappa corrigido das polpas.

Figura 25 – Número kappa corrigido

Apesar de apresentarem números kappa na mesma faixa, as polpas dos oito materiais apresentam diferentes teores de ácidos hexenurônicos e, conseqüentemente, diferentes proporções de lignina, representadas pelo número kappa corrigido. Os resultados permitem observar que as polpas de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) e *C. citriodora* (CIT 02) são as que apresentam maior número kappa corrigido, resultado do menor teor de ácidos hexenurônicos nestas polpas. Por outro lado, a polpa marrom de *C. torelliana* (TOR) é a que apresenta a menor quantidade de lignina.

A alvura é uma propriedade muito utilizada pelas indústrias de celulose, sendo um indicativo da qualidade da polpa e da presença de compostos cromóforos (COELHO et al., 2014). Ela é uma propriedade ótica da polpa celulósica, sendo calculada com base na

refletância de radiação nos comprimentos de onda próximos a 457 nm (MANFREDI et al., 2014). Os resultados de alvura nas polpas marrons e do teste de comparação de médias (Teste de Tukey) destes dados são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 – Alvura da polpa marrom – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)

Material genético	Alvura, %ISO
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	34,6 a
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	33,5 a
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	28,1 b
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	27,3 b
<i>C. torelliana</i> – TOR	26,7 bc
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	26,2 bc
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	25,8 bc
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	23,0 c

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Apesar de apresentarem números kappa muito próximos, as polpas dos diferentes materiais apresentam diferentes níveis de alvura. Neste caso, é possível verificar relação da alvura da polpa com as condições de cozimento. As polpas de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) e *C. citriodora* (CIT 01), cujas condições de fator H e álcali aplicado foram mais brandas, foram as que apresentaram maiores alvuras, enquanto a menor alvura foi observada na polpa de *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01), cujas condições de cozimento foram mais agressivas.

A viscosidade é um parâmetro importante para avaliação da qualidade da polpa celulósica, pois está associada ao grau médio de polimerização das cadeias de celulose, sendo utilizada para estimar o nível de degradação dos carboidratos (DUARTE, 2006). A Tabela 31 apresenta os resultados de viscosidade das polpas e do teste de comparação de médias (Teste de Tukey) destes dados.

Tabela 31 – Viscosidade – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)

Material genético	Viscosidade, $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	1.427 a
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	1.341 ab
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	1.302 bc
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	1.296 bc
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	1.287 bc
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	1.273 bcd
<i>C. torelliana</i> – TOR	1.230 cd
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	1.180 d

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

As polpas marrons de *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02) e *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) são as que apresentam as maiores viscosidades. Já o menor nível de viscosidade é encontrado na polpa de *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01), indicando sua maior degradação, devido, sobretudo às condições de cozimento mais agressivas para a madeira deste híbrido.

Segura (2012) encontrou valores de viscosidade de $1.317 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ para a polpa de *E. grandis* x *E. urophylla* com número kappa 18, resultado bastante semelhante ao encontrado neste trabalho. A viscosidade encontrada para a polpa de *C. torelliana* também está de acordo com o que é relatado em literatura. Analisando a polpa desta espécie com número kappa de 16,0; Barrichelo e Brito (1976) encontraram viscosidade de aproximadamente $1.200 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. Miranda e Barrichelo (1990) obtiveram viscosidade de $1.057 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ para polpa de *C. citriodora* com kappa 17,9, valores inferiores à viscosidade encontrada para as polpas desta espécie no presente trabalho.

A seletividade do processo de polpação é a relação entre a viscosidade da polpa e o número kappa da polpa marrom, indicando a capacidade do processo em preservar as cadeias de celulose, aliado à manutenção do rendimento em polpa. Os resultados de seletividade podem ser observados na Figura 26.

Figura 26 – Seletividade do processo de polpação

A madeira de *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02) se destaca por apresentar o processo de polpação mais seletivo, resultado principalmente da preservação de carboidratos comprovada pela alta viscosidade da polpa deste híbrido, fato relacionado às boas características químicas deste material. Por outro lado, o processo de polpação de *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01) é o menos seletivo, sendo a polpa deste híbrido a mais degradada dentre as analisadas neste trabalho.

Na Tabela 32 é possível observar os resultados do incremento médio anual de celulose (IMACEL).

Tabela 32 – Incremento Médio Anual de Celulose proporcional ao do material de referência (URG)

Material genético	IMACEL, $\text{tsa} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$	IMACEL proporcional a URG, %
URG	7,8	100,0
CIT 01	7,6	98,2
T x C 01	3,8	49,5
T x C 02	6,4	81,9
C x T 01	4,8	62,3
C x T 02	8,4	108,0

O incremento médio anual de celulose (IMACEL) é a relação entre o incremento médio anual (IMA) florestal e o consumo específico de madeira, ou seja, está relacionado à

densidade básica da madeira e ao seu rendimento em polpa celulósica. Dessa forma, neste trabalho foi possível calcular o IMACEL apenas para os seis materiais em que havia informações de inventário florestal. Dentre esses materiais, o híbrido *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02) se destaca por apresentar maior produção anual de celulose por hectare, resultado principalmente de sua alta produtividade florestal e alta densidade básica. A madeira de *C. citriodora* (CIT 01), apesar de apresentar alta densidade básica e alto rendimento, possui um incremento médio anual (IMA) mais baixo e, desta forma, tem seu IMACEL 9,5% mais baixo que o híbrido citado anteriormente. O menor IMACEL é observado para *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01), consequência de sua baixa produtividade florestal e baixo rendimento no processo de polpação.

4.2.2 Análises do licor

A análise do licor negro durante cozimentos modificados de polpação é uma importante ferramenta no acompanhamento do processo. Este monitoramento permite a obtenção de informações fundamentais, permitindo avaliar a necessidade de alterações na carga alcalina em injeções de licores subsequentes e no fator H aplicado. No presente trabalho foram avaliados os teores de sólidos totais, sólidos inorgânicos, sólidos orgânicos, álcali ativo e pH dos licores, que foram coletados a cada 30 minutos, antes de cada extração de licor negro, após cada extração de licor branco e ao final dos cozimentos, totalizando doze amostras de licor negro e uma amostra de licor branco inicial em cada cozimento. Os perfis de álcali ativo e sulfidez dos licores negros ao longo dos cozimentos podem ser observados no Apêndice G.

O teor de sólidos gerados por tonelada de celulose produzida (t/tsa) leva em consideração todos os sólidos gerados no processo de polpação, sejam eles orgânicos ou inorgânicos, provenientes do licor de cozimento ou da madeira. Bassa (2006) cita que a caldeira de recuperação de uma fábrica de celulose apresenta capacidade de queima de sólidos determinada e, desde que não haja restrição na alimentação de cavacos nem na disponibilidade de vapor, a capacidade de queima de sólidos determina a capacidade de produção de polpa celulósica de uma unidade industrial. Desta forma, o teor de sólidos gerados no processo de produção de celulose apresenta relação direta com a capacidade máxima de produção de uma fábrica. Os resultados de teor de sólidos gerados e do teste de comparação de médias (Teste de Tukey) destes dados são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 – Sólidos gerados nos cozimentos – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)

Material genético	Sólidos Gerados, t/tsa
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	1,52 a
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	1,41 b
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	1,32 c
<i>C. torelliana</i> – TOR	1,28 c
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	1,27 c
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	1,23 c
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	1,10 d
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	1,08 d

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Como a geração de sólidos está relacionada ao rendimento do processo de polpação e à carga alcalina aplicada, o processo de polpação do híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* e da espécie *C. citriodora* (CIT 01) são os que geraram menor quantidade de sólidos, uma vez que nesses casos houve as menores aplicações de álcali e os maiores rendimentos dentre todos os cozimentos realizados neste trabalho. Já o cozimento de *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01), cuja necessidade de álcali é maior e os rendimentos são os mais baixos, gera maior quantidade de sólidos. Desta forma, pode-se afirmar que a caldeira de recuperação de uma fábrica que utiliza a madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) ou *C. citriodora* (CIT 01) operaria com maior folga, enquanto que em uma fábrica que utilize a madeira de *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01) receberia uma maior quantidade de sólidos dissolvidos, o que poderia prejudicar a capacidade produtiva da planta no caso da quantidade de sólidos gerados exceder o limite de queima da caldeira.

Os resultados de álcali residual e sulfidez do licor negro ao longo do cozimento, apresentados no Apêndice G, confirmam que o consumo de hidróxido de sódio (NaOH) ocorre em ritmo mais acelerado que o consumo de sulfeto de sódio (Na₂S), uma vez que é observado o aumento da sulfidez com a diminuição do álcali ativo, ou seja, apesar de também ser consumido, o sulfeto de sódio tem sua proporção no álcali ativo aumentada ao longo dos cozimentos. A Tabela 34 apresenta os resultados do consumo alcalino total e em cada uma das fases do cozimento modificado para as oito madeiras analisadas.

Tabela 34 – Consumo de álcali ativo em cada fase de cozimento

Fase do cozimento	URG	CIT 01	CIT 02	TOR	T x C 01	T x C 02	C x T 01	C x T 02
Impregnação, g·L ⁻¹	16,7	14,7	17,3	17,5	21,6	19,9	19,9	19,4
1ª fase de cozimento, g·L ⁻¹	10,5	12,1	8,5	14,1	17,1	14,5	12,6	13,6
2ª fase de cozimento, g·L ⁻¹	2,0	1,9	2,5	2,4	4,7	2,5	3,2	3,9
Total, g·L ⁻¹	29,2	28,6	28,3	34,0	43,4	36,9	35,6	36,9

Para todos os materiais, o consumo de álcali durante os 30 minutos de impregnação equivale a mais de 50% de todo o álcali consumido durante os 265 minutos de cada ensaio. Esse resultado também foi encontrado por Segura (2012) e é reflexo do alto consumo de álcali no início do cozimento, sem a ocorrência do processo de deslignificação. De acordo com Kleppe (1970), apenas uma pequena parte da lignina é removida em temperaturas abaixo de 140°C em cozimentos kraft. Assim, para a obtenção de uma deslignificação eficiente, é necessário que os processos de polpação sejam conduzidos a temperaturas superiores a 140°C. Como o licor de cozimento não é completamente seletivo (GOMES, 2009), parte do consumo alcalino se dá pela degradação de outros compostos da madeira, principalmente os carboidratos. Além disso, o consumo alcalino é maior em condições de maior concentração alcalina. Neste contexto, uma importante variável em cozimentos modificados é a distribuição de álcali. A partir dela, é possível controlar a concentração alcalina do licor durante o processo de cozimento, garantindo que esta concentração não seja alta a ponto de haver degradação excessiva dos carboidratos, o que prejudicaria o rendimento do processo de polpação e a qualidade da polpa produzida, nem baixa a ponto de haver falta de álcali para o processo de deslignificação ou precipitação da lignina sobre a polpa (BUGAJER, 1980). Em condições normais de cozimento, a precipitação de lignina é considerável em pH inferior a 11, sendo que as estruturas de lignina precipitadas afetam a branqueabilidade da polpa, pois são de difícil remoção na operação de branqueamento (PIMENTA et al., 2007). No presente trabalho optou-se, nos cozimentos de todos os materiais genéticos, pela distribuição alcalina tipicamente utilizada para a madeira de *E. grandis* x *E. urophylla*, com 50% do álcali aplicado na fase de impregnação, 30% na primeira fase de cozimento e 20% na segunda fase de cozimento. Os resultados (Apêndice G) mostram que esta distribuição também pode ser otimizada, principalmente para os materiais genéticos que demandam maior carga alcalina. Nesse caso, o álcali residual da impregnação tende a ser mais alto – como o licor deste ponto é removido do sistema, há um excesso de álcali nesta fase do cozimento, fato que poderia ser

minimizado com a aplicação de uma menor quantidade de álcali no início do cozimento, o que modificaria a distribuição alcalina ou a carga de álcali aplicada.

Com base nos resultados deste trabalho, pode-se afirmar que o consumo de álcali ao longo de processos de polpação está relacionado aos seguintes fatores:

- Composição química da madeira (teor de lignina, extrativos e holocelulose);
- Solubilidade da lignina da madeira;
- Proporção de carboidratos de baixa massa molecular, sendo mais suscetíveis ao ataque do álcali;
- Tempo e temperatura de cozimento (fator H);
- Concentração alcalina.

Dentre os materiais analisados neste trabalho, o cozimento do híbrido *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01) é o que consome maior proporção de álcali, fato relacionado principalmente às condições de cozimento, ou seja, à aplicação de altos níveis de álcali ativo e temperatura para este material. Por outro lado, os cozimentos do híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) e de ambos os materiais de *C. citriodora* (CIT 01 e CIT 02) são os que consomem menos álcali ativo, reflexo dos menores álcalis aplicados e menores temperatura de cozimento.

Os gráficos de temperatura e fator H dos cozimentos podem ser encontrados no Apêndice E, enquanto os dados detalhados de álcali residual e teor de sólidos ao longo dos cozimentos são apresentados no Apêndice F.

Já a Figura 27 apresenta os consumos de álcali ativo e álcali efetivo por tonelada de polpa marrom produzida.

Figura 27 – Consumo de álcali

Para a produção de 1 tonelada de polpa celulósica não branqueada, a madeira de *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01) demanda 76% mais álcali ativo que a madeira de *C. citriodora* (CIT 01), variação que se deve, principalmente, às diferenças químicas observadas entre os materiais. Além de influenciar o rendimento do processo de polpação, o consumo de álcali reflete diretamente na área de caustificação de uma fábrica de celulose, onde é produzido o licor branco. O maior consumo alcalino do híbrido *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01) poderia sobrecarregar esta área e, dependendo de seu dimensionamento, limitar a capacidade de produção de celulose da planta. Por outro lado, a caustificação de fábricas que utilizariam as madeiras de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) e *C. citriodora* (CIT 01 e CIT 02) poderiam trabalhar com maior folga.

4.3 Deslignificação com oxigênio

A deslignificação com oxigênio, introduzida comercialmente nos anos 1970, pode ser considerada um prolongamento do cozimento, em uma fase anterior ao branqueamento. Nesta etapa há a aplicação de uma carga de oxigênio na polpa marrom em meio alcalino, com o objetivo principal de reduzir a quantidade de lignina na polpa (SEGURA, 2012). Os resultados da deslignificação com oxigênio são apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 – Resultados da deslignificação com oxigênio

Parâmetro	URG	CIT 01	CIT 02	TOR	T x C 01	T x C 02	C x T 01	C x T 02
Número kappa	11,0	7,6	8,3	8,9	8,3	8,0	8,4	7,5
Ácidos Hexenurônicos, μmolg^{-1}	48,5	53,0	56,3	67,7	65,5	61,0	61,4	51,5
Número kappa corrigido	6,8	3,1	3,4	3,1	2,7	2,7	3,1	3,0
Alvura, % ISO	45,9	53,7	47,8	49,0	46,6	52,0	50,8	49,7
Viscosidade, $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$	1.019	812	852	832	806	939	844	974
Eficiência da redução de kappa, %	40,8	57,7	56,2	52,5	55,0	57,5	55,0	58,1
Eficiência de deslignificação, %	52,4	77,3	76,4	75,9	79,9	79,7	77,1	77,8

A Tabela 36 apresenta os resultados de número kappa após a deslignificação com oxigênio e do teste de comparação de médias (Teste de Tukey) destes dados.

Tabela 36 – Número kappa – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)

Material genético	Número kappa	
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	11,0	a
<i>C. torelliana</i> – TOR	8,9	b
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	8,4	bc
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	8,3	bc
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	8,3	bc
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	8,0	bc
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	7,6	bc
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	7,5	c

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

As sete polpas de *C. citriodora*, *C. torelliana* e seus híbridos apresentam comportamentos completamente distintos da polpa de referência (*E. grandis* x *E. urophylla*) no processo de deslignificação com oxigênio. É possível observar que as polpas deslignificadas desses materiais apresentam números kappa inferiores à polpa do material de referência.

A melhor eficiência da deslignificação das polpas de *Corymbia* em relação à polpa do material de referência (*E. grandis* x *E. urophylla*) deve estar relacionada a diferenças das ligninas presentes na madeira deste gênero ou em modificações sofridas pela lignina destas espécies e híbridos durante a fase de cozimento (PRINSEN et al., 2014). Gomes et al. (2008) estudaram madeiras com diferentes proporções de ligninas dos tipos siringil e guaiacil, indicando que quanto maior for a relação siringil/guaiacil, mais solúvel será a lignina durante os processos de deslignificação.

Os resultados dos ácidos hexenurônicos após a deslignificação com oxigênio e do teste de comparação de médias (Teste de Tukey) destes dados são apresentados na Tabela 37.

Tabela 37 – Teor de ácidos hexenurônicos – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)

Material genético	Ácidos Hexenurônicos, μmolg^{-1}
<i>C. torelliana</i> – TOR	67,7 a
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	65,5 a
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	61,4 ab
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	61,0 ab
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	56,3 bc
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	53,0 bc
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	51,5 c
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	48,5 c

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Conforme esperado, os teores de ácidos hexenurônicos nas polpas não foram modificados na deslignificação com oxigênio, tendência também observada por Colodette et al. (2007) e Vivian (2015). O número kappa corrigido das polpas após a deslignificação com oxigênio, descontando a participação dos ácidos hexenurônicos do número kappa, é apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Número kappa corrigido após a deslignificação com oxigênio

Por apresentar um maior número kappa e menor teor de ácidos hexenurônicos, a polpa deslignificada de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) apresenta maior número kappa corrigido.

Assim, pode-se inferir que a polpa deslignificada deste híbrido apresenta maior teor de lignina que as demais polpas avaliadas.

Com base nos números kappa e nos números kappa corrigidos das polpas, foi possível calcular a eficiência de redução de kappa e a eficiência de deslignificação, apresentados na Figura 29.

Figura 29 – Eficiência de deslignificação e da redução de kappa na deslignificação com oxigênio

Pode-se observar que a deslignificação com oxigênio foi extremamente eficiente para as polpas de *C. citriodora*, *C. torelliana* e seus híbridos. Para todos estes materiais a eficiência de deslignificação foi superior a 75%, enquanto a eficiência de redução do número kappa foi superior a 52%. Já para a polpa de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) as eficiências de redução do kappa e de deslignificação foram inferiores em comparação aos demais materiais.

As diferenças de eficiência de deslignificação entre os materiais genéticos avaliados neste trabalho mostram que as condições de deslignificação com oxigênio podem ser otimizadas para cada material. Como as polpas deslignificadas de *Corymbia* apresentam menor número kappa que a polpa de *E. grandis* x *E. urophylla*, as condições de deslignificação para as polpas destas espécies e híbridos poderiam ser mais brandas, com possíveis reduções de tempo e temperatura, fatores que seriam benéficos à qualidade da polpa celulósica, apresentando também potencial de redução dos custos desta etapa de produção em uma fábrica de polpa celulósica.

As alvuras das polpas deslignificadas com oxigênio podem ser observadas na Tabela 38 juntamente com o teste de comparação de médias (Teste de Tukey) destes dados.

Tabela 38 – Alvura – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)

Material genético	Alvura, % ISO
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	53,7 a
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	52,0 ab
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	50,8 ab
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	49,7 ab
<i>C. torelliana</i> – TOR	49,0 ab
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	47,8 ab
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	46,6 b
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	45,9 b

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

As alvuras de todas as polpas deslignificadas são muito próximas entre si, com destaque para a polpa de *C. citriodora* (CIT 01), que apresenta maior alvura. Por outro lado, as menores alvuras foram observadas para as polpas de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) e *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01).

Os resultados de viscosidade das polpas deslignificadas com oxigênio e do teste de comparação de médias (Teste de Tukey) destes dados são observados na Tabela 39.

Tabela 39 – Viscosidade – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)

Material genético	Viscosidade, cm³ g⁻¹
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	1.019 a
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	974 ab
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	939 abc
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	852 bc
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	844 bc
<i>C. torelliana</i> – TOR	832 bc
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	812 c
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	806 c

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

As polpas deslignificadas de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG), *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 02) e *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02) são as que apresentam maior viscosidade, enquanto as menores viscosidades são observadas para as polpas de *C. citriodora* (CIT 01) e *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01). Esses resultados são consequência das diferentes condições de cozimento utilizadas para estes materiais.

Com base nos resultados da deslignificação com oxigênio, é possível afirmar que as condições desta fase do processo de produção de celulose podem ser otimizadas para polpas do gênero *Corymbia*. As seguintes otimizações podem ser consideradas para a deslignificação com oxigênio de polpas de *Corymbia*:

- redução no tempo de reação;
- redução da temperatura;
- redução da carga de hidróxido de sódio (NaOH) aplicada.

Assim, as condições da deslignificação com oxigênio de polpas de *Corymbia* seriam mais brandas que aquelas do material de referência, permitindo ganhos econômicos (menor reator, menor demanda energética e menor quantidade de químicos aplicada) e na qualidade da polpa celulósica, principalmente na preservação dos carboidratos e consequente aumento de viscosidade.

4.4 Branqueamentos

De acordo com Singh (1979), o principal objetivo do branqueamento é aumentar a alvura da polpa, tornando-a mais adequada para a manufatura de papéis de escrever e tissue, removendo ou modificando alguns componentes das polpas marrons, incluindo fragmentos de lignina e os produtos de sua degradação, resinas, íons metálicos e carboidratos não celulósicos. Os resultados dos branqueamentos e as características das polpas branqueadas são observados na Tabela 40.

Tabela 40 – Características das polpas branqueadas e consumo de químicos no branqueamento

Parâmetro	URG	CIT 01	CIT 02	TOR	T x C 01	T x C 02	C x T 01	C x T 02
Alvura, % ISO	89,6	90,0	88,5	89,1	88,1	89,8	89,5	89,5
Viscosidade, $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	798	703	613	572	607	715	673	725
Reversão de alvura, %	2,0	2,1	2,1	1,4	1,8	1,4	2,0	2,1
Consumo de ClO_2 , $\text{kg} \cdot \text{tsa}^{-1}$	10,4	9,1	13,5	13,2	13,5	12,3	10,2	11,8
Consumo de H_2O_2 , $\text{kg} \cdot \text{tsa}^{-1}$	3,5	4,0	7,0	7,0	7,0	4,0	4,5	4,0
Consumo de NaOH , $\text{kg} \cdot \text{tsa}^{-1}$	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Consumo de H_2SO_4 , $\text{kg} \cdot \text{tsa}^{-1}$	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
Cloro Ativo Total Equivalente, $\text{kg} \cdot \text{tsa}^{-1}$	34,7	32,3	50,1	49,3	50,1	40,7	36,2	39,4
Branqueabilidade, kappa/Cloro Ativo	0,317	0,236	-	0,181	-	0,196	0,232	0,190

Conforme pode ser observado, as polpas de *C. citriodora* (CIT 02) e *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01) não atingiram a alvura desejada, mesmo com a aplicação de uma grande quantidade de reagentes químicos. Esses resultados podem indicar modificações na estrutura da lignina destas polpas durante os processos de deslignificação e branqueamento, o que dificultaria a remoção deste componente. Assim, pode-se inferir que as condições de branqueamento destas polpas devem ser otimizadas. Uma possibilidade é o aumento do fator kappa na etapa DA, aumentando assim a carga de dióxido de cloro aplicada nesta fase do branqueamento, somada ao aumento do tempo ou temperatura deste estágio. Essas modificações poderiam impactar positivamente na alvura da polpa branqueada. As demais polpas celulósicas atingiram alvura na faixa de $89,5 \pm 0,5$ % ISO.

Os resultados de viscosidade das polpas branqueadas e do teste de comparação de médias (Teste de Tukey) destes dados são apresentados na Tabela 41.

Tabela 41 – Viscosidade – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)

Material genético	Viscosidade, $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	798 a
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	725 ab
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	715 ab
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	703 abc
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	673 bc
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	613 cd
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	607 cd
<i>C. torelliana</i> – TOR	572 d

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

A viscosidade da polpa branqueada do material de referência (*E. grandis* x *E. urophylla*) está de acordo com o que é descrito em outros trabalhos. Segura (2012) encontrou viscosidade de $763 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ para polpa deste híbrido com número kappa inicial de 18, enquanto Vivian (2015) cita viscosidade de $755 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ para polpa do mesmo híbrido com número kappa inicial de 15.

Dentre as polpas branqueadas, aquelas de *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02), *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 02) e *C. citriodora* (CIT 01) apresentam, juntamente com o material de referência (*E. grandis* x *E. urophylla*) as maiores viscosidades observadas neste

trabalho. Já as polpas branqueadas de *C. citriodora* (CIT 02), *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 02) e *C. torelliana* (TOR) são as que possuem as menores viscosidades.

A viscosidade final da polpa branqueada é consequência da viscosidade da polpa marrom, das condições de deslignificação com oxigênio e das condições de branqueamento. No presente trabalho, isso também foi observado. As maiores viscosidades finais foram observadas para as polpas cujas viscosidades iniciais eram mais altas (C x T 02, URG e T x C 02) e as condições de branqueamento mais brandas (CIT 01). Por outro lado, as menores viscosidades finais foram atingidas nas polpas cujo processo global de produção, incluindo cozimento, deslignificação e branqueamento, foi mais agressivo, refletindo na maior degradação destas polpas.

Um dos principais parâmetros de qualidade no processo de branqueamento é a estabilidade de alvura. A exposição da polpa branqueada a fatores externos como luz, calor, umidade, produtos químicos e oxigênio pode provocar o seu amarelecimento, conhecido como reversão de alvura (CAZAL, 2006). De acordo com Costa et al. (2003), as polpas branqueadas podem conter grupos funcionais que originam grupos cromóforos, responsáveis pelo escurecimento da polpa.

A intensidade da reversão depende de fatores ambientais e químicos da polpa. O processo de reversão de alvura pode ser influenciado pelas características da matéria-prima (tipo de fibra, idade, taxa de crescimento, localização, lavagem, condições e tempo de estocagem), processo de fabricação (tipo de processo, parâmetros, sequência de branqueamento, água e íons metálicos) e estocagem (luz, oxigênio, circulação de ar, calor, umidade, poluentes e tempo) (FORSSKÄHL, 2000).

A análise de variância dos resultados de reversão de alvura, que podem ser observados no Apêndice D, mostra que não há diferença estatística significativa entre os valores encontrados para este parâmetro nas polpas dos oito materiais genéticos analisados. A reversão de alvura média encontrada neste trabalho foi de 1,9% ISO. Esse resultado está de acordo com o que é citado em literatura para este parâmetro. Andrade e Colodette (2011) encontraram reversão de alvura de 2,2 a 3,1 % ISO para polpa de eucalipto branqueada na sequência D_{HT} Ep D P, enquanto Costa et al. (2003) descrevem reversão de alvura variável entre 1,8 e 2,9% ISO para polpa de eucalipto branqueada através da sequência D₀ (EP) D₁ P.

Em relação ao consumo de reagentes químicos, foram aplicadas as mesmas cargas de hidróxido de sódio (NaOH) e ácido sulfúrico (H₂SO₄) em todos os branqueamentos. Já os consumos de dióxido de cloro e peróxido de hidrogênio foram variáveis, sendo que o consumo de cloro ativo total para cada um dos materiais é apresentado na Figura 30.

Figura 30 – Consumo de Cloro Ativo Total Equivalente no processo de branqueamento

A polpa de *C. citriodora* (CIT 01) foi a que demandou a menor quantidade de reagentes químicos para atingir a alvura definida, seguida pelo material de referência (*E. grandis* x *E. urophylla* - URG). Dentre as polpas que atingiram a alvura de $89,5 \pm 0,5$ % ISO, a polpa de *C. torelliana* (TOR) foi a que demandou maior quantidade de reagentes químicos; esses resultados impactam diretamente os custos de branqueamento. Nas polpas de *C. citriodora* (CIT 02) e *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01) foi aplicada uma grande quantidade de químicos, porém, conforme já discutido, as alvuras destas polpas não atingiram a faixa de $89,5 \pm 0,5$ % ISO.

O consumo de químicos nos branqueamentos deste trabalho pode ser considerado baixo. No branqueamento de *E. grandis* x *E. urophylla*, Vivian (2015) aplicou $49,3 \text{ kg} \cdot \text{tsa}^{-1}$, atingindo alvura de 92,3% ISO, enquanto Gomes et al. (2012) aplicaram $32 \text{ kg} \cdot \text{tsa}^{-1}$ para atingir alvura de 90% ISO. Desta forma observa-se que as condições operacionais e as cargas de reagentes químicos empregadas no branqueamento das polpas que atingiram alvura de $89,5 \pm 0,5$ % ISO foram adequadas para as polpas celulósicas avaliadas.

A branqueabilidade das polpas foi calculada com base no consumo de químicos na fase de branqueamento e no número kappa após a deslignificação. Por apresentar maior número kappa de entrada no branqueamento e consumo de reagentes químicos relativamente baixo, a polpa de referência (*E. grandis* x *E. urophylla* - URG) possui a melhor branqueabilidade, seguida da polpa de *C. citriodora* (CIT 01). A menor branqueabilidade foi observada para a polpa de *C. torelliana* (TOR), sendo que este parâmetro não foi calculado para os materiais *C. citriodora* (CIT 02) e *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01), uma vez que tais polpas não

atingiram a alvura final pré-determinada. Vivian (2015) encontrou branqueabilidade de 0,308 unidades de kappa por $\text{kg} \cdot \text{tsa}^{-1}$ de cloro ativo para a polpa de *E. grandis* x *E. urophylla*, valor consoante ao encontrado para a polpa do mesmo híbrido neste trabalho.

4.5 Morfologia das fibras das polpas branqueadas

A morfologia das fibras das polpas branqueadas pode ser observada na Tabela 42.

Tabela 42 – Características morfológicas das polpas branqueadas

Parâmetro	URG	CIT 01	CIT 02	TOR	T x C 01	T x C 02	C x T 01	C x T 02
<i>Coarseness</i> , mg·100 m ⁻¹	5,70	6,73	7,44	6,38	7,28	7,34	6,12	7,16
População fibrosa, mi fibras·g ⁻¹	24,08	19,25	17,57	17,75	16,81	17,20	21,83	18,67
Comprimento médio, mm	0,65	0,70	0,68	0,76	0,72	0,69	0,66	0,67
Largura média, µm	17,15	17,45	17,50	17,60	18,10	18,45	17,30	18,10
Fração parede, %	34,1	40,4	46,0	36,8	40,7	39,0	36,5	39,8
Teor de finos em comprimento, %	12,55	10,80	10,80	18,70	13,15	17,05	18,30	10,25

O *coarseness* representa a massa de fibras por unidade de comprimento. Os resultados deste parâmetro estão de acordo com o que é mencionado por Foelkel (2007), que cita que o *coarseness* pode variar de 4,5 a 11 mg·100 m⁻¹. As polpas dos sete materiais de *C. citriodora*, *C. torelliana* e seus híbridos apresentaram maior *coarseness* em relação à polpa de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG). A polpa de *C. citriodora* (CIT 02) é a que apresenta maior *coarseness* entre todos os materiais avaliados. Os resultados deste parâmetro estão condizentes com o que é descrito por Vivian (2015), que encontrou valores de 5,80 a 6,10 mg·100 m⁻¹ de *coarseness* em polpas branqueadas de *E. grandis* x *E. urophylla*.

A relação entre população fibrosa e *coarseness* foi investigada, podendo ser observada na Figura 31.

Figura 31 – Relação entre população fibrosa e *coarseness* das fibras das polpas branqueadas

De acordo com Foelkel (2009), a população fibrosa guarda relação com o *coarseness*. Segundo o autor, polpas com maior *coarseness* apresentam menor população fibrosa, resultado também observado neste trabalho, conforme pode ser observado na Figura anterior. Dentre todas as polpas avaliadas, a maior população fibrosa é observada para aquela de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG), enquanto a polpa de *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01) é a que apresenta o menor valor para este parâmetro.

Além de apresentar maior população fibrosa, a polpa do material de referência (de *E. grandis* x *E. urophylla* - URG) apresenta o menor comprimento médio das fibras, confirmando a relação inversa entre estes dois parâmetros. Resultados similares foram

observados por Menegazzo (2012), Segura (2012) e Vivian (2015). Não foram observadas diferenças de largura das fibras nas polpas avaliadas.

A fração parede das fibras branqueadas também exerce influência nas propriedades do papel. De acordo com Menegazzo (2012), fibras com maior fração parede são rígidas e mais difíceis de colapsarem. Assim, a ligação entre fibras e a consolidação da folha de papel são prejudicadas, dando origem a papéis mais porosos, volumosos, rugosos e absorventes. As polpas oriundas de madeiras com maior densidade básica apresentam maior fração parede. Assim, a polpa de *C. citriodora* (CIT 02) é a que apresenta maior fração parede, enquanto a polpa do material de referência (URG) possui o menor valor para este parâmetro.

No presente trabalho, também foi avaliada a relação entre fração parede e *coarseness*. Esta relação é apresentada na Figura 32.

Figura 32 – Relação entre fração parede e *coarseness* das fibras das polpas branqueadas

Conforme esperado, fração parede e *coarseness* das fibras branqueadas guardam relação direta entre si, ou seja, o aumento da fração parede resulta no aumento do *coarseness*. Como a fração parede guarda relação direta também com a densidade básica, pode-se observar elevação do *coarseness* com o aumento da densidade básica da madeira, fato também relatado por Demuner et al. (1991) e Almeida (2003).

Os elementos finos são formados durante as etapas de cozimento e branqueamento da polpa e compreendem fibras curtas e pedaços de fibras e de vasos, células de parênquima e outras células do xilema. De acordo com Vivian (2015), os finos apresentam influência nas

propriedades do papel, podendo reduzir as características de resistência mecânica das polpas quando seu teor é muito alto. As polpas de *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02) e *C. citriodora* (CIT 01 e CIT 02) se destacaram por apresentar os menores teores de finos entre as oito polpas avaliadas, enquanto que os maiores teores foram observados para as polpas de *C. torelliana* (TOR) e *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01). O teor de finos da polpa de *E. grandis* x *E. urophylla* está um pouco acima do relatado por Segura (2012), que encontrou um valor de 10,2% para a polpa branqueada do mesmo híbrido com número kappa inicial de 18.

4.6 Refino e testes físico-mecânicos das polpas branqueadas

As polpas branqueadas foram refinadas em quatro níveis (0, 750, 1.500 e 3.000 revoluções) e tiveram suas propriedades físico-mecânicas avaliadas. A drenabilidade, expressa em grau Schopper-Riegler, indica a facilidade da polpa em escoar água, sendo um importante parâmetro de avaliação do entrelaçamento das fibras - quanto maior a drenabilidade da polpa, menor é sua capacidade de escoar água. A Figura 33 apresenta os resultados de drenabilidade.

Figura 33 – Drenabilidade das polpas em função do número de revoluções

A drenabilidade da polpa celulósica aumenta com a evolução do refino, fato observado para todos os materiais refinados neste trabalho. As polpas de *C. torelliana* x *C. citriodora* (T

x C 01), *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01) e *C. torelliana* (TOR) são as que apresentaram maior drenabilidade em todos os graus de refino, fato relacionado com o maior teor de finos destas polpas. O aumento da drenabilidade com o aumento do teor de finos da polpa celulósica também foi descrito por Ferreira; Henriques e Figueiredo (2001). As polpas de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) e *C. citriodora* (CIT 01 e CIT 02) apresentaram os menores valores de drenabilidade.

O volume específico da polpa, também conhecido como “bulk”, é uma propriedade bastante valorizada pelos fabricantes de celulose e papel. Um alto volume específico aumenta a capacidade de absorção de água pela folha, sendo considerado importante na produção de papéis sanitários e que requerem alta absorção (*tissue*) (MENEGAZZO, 2012). Os resultados de volume específico são apresentados na Figura 34.

Figura 34 – Volume específico das polpas em função do número de revoluções

As polpas de *C. citriodora* (CIT 01 e CIT 02) se destacam por apresentar os mais altos valores de volume específico. Essa característica da espécie indica sua aptidão para a utilização de sua polpa na fabricação de papéis de alta absorção (*tissue*). Os híbridos de *C. torelliana* x *C. citriodora* (C x T 01 e C x T 02) também apresentam polpas com maior volume específico que a polpa de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) em todos os graus de refino. Já as polpas de *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01 e C x T 02) são as que apresentam os menores valores de volume específico.

A resistência à passagem do ar indica a dificuldade de passagem do ar pela folha de celulose, sendo dependente do número, tamanho, forma e distribuição dos poros no papel (D'ALMEIDA et al., 2004). Essa propriedade influencia a secagem, impressão, impregnação e revestimento do papel, sendo os resultados para este parâmetro apresentados na Figura 35.

Figura 35 – Resistência à passagem do ar das polpas em função do número de revoluções

O aumento da resistência à passagem do ar com a evolução do refino é mais pronunciado para as polpas de *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01 e C x T 02). Já as polpas de *C. citriodora* (CIT 01 e CIT 02) apresentam menor resistência à passagem do ar que as demais polpas avaliadas a partir de 1.500 revoluções.

Os resultados de volume específico e resistência à passagem do ar indicam que, em uma fábrica, as polpas da espécie *C. citriodora* são as que apresentariam maior facilidade de secagem, enquanto as polpas de *C. citriodora* x *C. torelliana* são as que apresentariam maior dificuldade nesta etapa de produção de polpa celulósica.

A opacidade é uma característica fundamental para papéis de imprimir e escrever. De acordo com Silva (2011), quanto mais opaco for o papel menos transparente ele será, o que permite uma melhor impressão frente e verso. A Figura 36 apresenta os resultados de opacidade das polpas analisadas neste trabalho.

Figura 36 – Opacidade das polpas em função do número de revoluções

As polpas branqueadas de *E. grandis* x *E. urophylla* e *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01) são as que apresentam as maiores opacidades dentre todas as polpas sem refino. Com a evolução do refino, observa-se redução da opacidade das polpas de todos os materiais, sendo que, após 3.000 revoluções, as polpas de *C. citriodora* (CIT 01 e CIT 02) foram as que apresentaram os maiores valores de opacidade. Foi investigada a relação entre opacidade das polpas sem refino e a população fibrosa, sendo os resultados apresentados na Figura 37.

Figura 37 – Relação entre opacidade das polpas sem refino e população fibrosa

É possível constatar que a opacidade da polpa celulósica é fortemente influenciada pela população fibrosa. Esses resultados são explicados pelo fato de que quanto maior o teor de fibras no papel, mais difícil se torna para os feixes de luz atravessarem sua estrutura.

Outra importante propriedade das polpas celulósicas é a capilaridade, que representa a penetração de água pelos capilares em folhas de celulose. A ascensão capilar é a distância entre a superfície da água e o ponto até onde esta subiu no corpo de prova em determinado período de tempo. Já o índice de retenção de água indica a capacidade da polpa em reter água em sua estrutura. Estas propriedades são importantes na etapa de secagem, uma vez que o principal objetivo deste processo é retirar a água da polpa, sendo importantes parâmetros em polpas destinadas à produção de papéis absorventes (*tissue*). Os resultados de capilaridade Klemm e índice de retenção de água são apresentados nas Figuras 38 e 39.

Figura 38 – Capilaridade Klemm das polpas em função do número de revoluções

Figura 39 – Índice de Retenção de Água das polpas em função do número de revoluções

As polpas de *C. citriodora* (CIT 01 e CIT 02) apresentam maior capilaridade e menor índice de retenção de água em todos os graus de refino, o que indica facilidade de passagem da água e, assim, de sua absorção pelas polpas desta espécie. Essas características reforçam a recomendação para a utilização da polpa de *C. citriodora* na fabricação de papéis *tissue*.

As polpas de *C. torelliana* (TOR) e *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01 e T x C 02) também apresentam maior capilaridade que a polpa de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG), enquanto as polpas de *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01 e C x T 02) são as que apresentam as menores capilaridades. Em relação ao índice de retenção de água, as polpas de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) e *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01) são as que apresentam a maior capacidade de retenção de água em sua estrutura.

O índice de tração é uma propriedade de grande importância para polpas direcionadas à fabricação de papel, uma vez que indica a probabilidade de quebra da folha durante seu processo de produção, bem como a resistência à tração do produto final. Esta propriedade é relacionada com a durabilidade e utilidade de um papel para embalagem e outros usos sujeitos a forças de tensão. No caso de papéis de imprimir e escrever, a resistência à tração indica a probabilidade de ruptura quando são sujeitos à tensão exercida durante o processo de impressão. O índice de tração das polpas é apresentado na Figura 40.

Figura 40 – Índice de tração das polpas em função do número de revoluções

As polpas de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) e *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01) foram as que apresentaram as maiores resistências à tração com a evolução do refino. Os demais materiais atingiram patamares próximos entre si de índice de tração. Observou-se que a polpa de *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02) apresentou comportamento discrepante em relação às demais, com maior índice de tração na polpa sem refino e menor evolução desta propriedade com o refino.

O índice de estouro é definido como a pressão necessária para produzir o arrebetamento da folha de celulose com a aplicação uma pressão uniformemente crescente, transmitida por um diafragma elástico com área circular (SILVA, 2011). Os resultados do índice de estouro são apresentados na Figura 41.

Figura 41 – Índice de estouro das polpas em função do número de revoluções

As polpas de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) e *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01) apresentam os maiores índices de estouro, enquanto as polpas de *C. citriodora* (CIT 01 e CIT 02) e *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01) apresentam as menores resistências ao estouro. A polpa de *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02) apresenta novamente comportamento diferente em relação às demais, uma vez que apresenta maior índice de estouro sem refino, não sendo observada evolução desta propriedade com o refino como ocorre com as demais polpas avaliadas.

O índice de rasgo representa a força necessária para continuar o rasgo a partir de um corte inicial em uma folha de papel (D'ALMEIDA et al., 2004). De acordo com Vivian (2015), os parâmetros referentes ao comprimento, orientação e resistência das fibras apresentam grande influência na resistência ao rasgo. Os resultados do índice de rasgo das polpas são apresentados na Figura 42.

Figura 42 – Índice de rasgo das polpas em função do número de revoluções

Nas polpas sem refino, o maior índice de rasgo é observado para a polpa de *C. torelliana* (TOR). Com a evolução do refino, as polpas de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG), *C. citriodora* (CIT 01 e CIT 02) e *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 02) se destacam, passando a apresentar o maior índice de rasgo. A partir de 1.500 revoluções este parâmetro é estabilizado, não havendo ganho de resistência com o refino acima deste nível para estes materiais. Os demais materiais apresentam menor índice de rasgo, que aumenta até 750 revoluções e cai após este nível de refino. Os resultados demonstram que o refino excessivo é prejudicial para o índice de rasgo destas polpas. Observa-se, mais uma vez, comportamento discrepante da polpa de *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02). O índice de rasgo da polpa deste híbrido não evolui com o refino, sendo que esta propriedade decresce com o aumento do número de revoluções.

Visando à produção de papéis de alta absorção (*tissue*), as propriedades das polpas branqueadas sem refino são apresentadas na Tabela 43. Já para a avaliação destas polpas para a utilização na fabricação de papéis de imprimir e escrever, foi ajustada uma regressão para cada uma das propriedades apresentadas anteriormente em função do índice de tração, fixado em $60 \text{ Nm} \cdot \text{g}^{-1}$. O índice de tração de $60 \text{ Nm} \cdot \text{g}^{-1}$ foi escolhido por ser uma referência de resistência à tração para produtores de papel. As características físico-mecânicas neste nível de resistência à tração podem ser observadas na Tabela 44, enquanto os resultados da análise de regressão para estes dados são apresentados no Apêndice H.

Tabela 43 – Propriedades físico-mecânicas das polpas branqueadas sem refino

Parâmetro	URG	CIT 01	CIT 02	TOR	T x C 01	T x C 02	C x T 01	C x T 02
Drenabilidade, °SR	17	16	16	18	18	17	20	16
Volume específico, $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	1,8	2,1	2,0	1,8	2,0	1,9	1,7	1,7
Resistência à passagem do ar, $\text{s} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$	0,7	0,7	0,7	0,7	1,4	0,7	1,8	1,9
Opacidade, %	77,9	76,0	75,4	75,7	75,9	75,7	77,1	76,3
Capilaridade Klemm, $\text{mm} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$	98	150	150	120	119	119	89	98
Índice de retenção de água, %	213,7	155,4	165,1	190,4	188,3	197,7	215,9	190,1
Índice de tração, $\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$	25,9	21,5	19,9	33,8	28,9	21,7	34,9	50,1
Índice de estouro, $\text{kPam}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	1,6	1,1	1,0	2,2	1,1	1,2	1,9	3,0
Índice de rasgo, $\text{mNm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	5,1	3,8	3,6	7,2	3,6	4,2	4,4	5,3

Tabela 44 – Propriedades físico-mecânicas das polpas branqueadas em função do índice de tração de 60 Nm·g⁻¹

Parâmetro	URG	CIT 01	CIT 02	TOR	T x C 01	T x C 02	C x T 01	C x T 02
Número de revoluções	1.206	1.793	2.118	1.294	1.422	1.779	876	1.020
Drenabilidade, °SR	26,6	30,0	36,4	31,9	35,1	36,0	30,1	26,9
Volume específico, cm ³ ·g ⁻¹	1,49	1,69	1,61	1,52	1,57	1,46	1,46	1,45
Resistência à passagem do ar, s·100 mL ⁻¹	2,8	1,9	3,2	2,8	6,1	5,7	6,7	16,6
Opacidade, %	74,3	73,3	73,2	72,4	72,8	71,4	74,0	72,3
Capilaridade Klemm, mm·10 min ⁻¹	60,6	84,3	65,9	79,0	62,8	54,6	56,8	54,5
Índice de retenção de água, %	253,4	223,1	232,5	238,3	239,7	256,0	246,9	234,6
Índice de estouro, kPam ² ·g ⁻¹	4,4	3,8	4,1	4,4	3,8	4,5	4,0	4,4
Índice de rasgo, mNm ² ·g ⁻¹	7,8	7,9	7,5	7,2	4,6	8,1	5,4	4,9

Os resultados apresentados nas Tabelas anteriores mostram que as polpas sem refino apresentam drenabilidade variável entre 16 e 20 °SR, volume específico entre 1,7 e 2,1 cm³·g⁻¹ e opacidade entre 75,4 e 77,9%. As polpas de *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01) e *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01 e C x T 02) se destacam por apresentar as maiores resistências à passagem do ar. Já as polpas de ambos os materiais genéticos de *C. citriodora* (CIT 01 e CIT 02) são as que apresentam os maiores valores de capilaridade e os menores valores de índice de retenção de água, confirmando os resultados observados anteriormente.

A polpa de *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02) apresenta a maior resistência à tração, enquanto que o menor índice de tração é observado para a polpa de *C. citriodora* (CIT 02). As polpas sem refino de *C. torelliana* (TOR) e *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02) se destacam por apresentar as maiores resistências ao estouro, enquanto que os maiores índices de rasgo foram encontrados para as polpas de *C. torelliana* (TOR), *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02) e *E. grandis* x *E. urophylla* (URG).

Já a comparação das polpas celulósicas branqueadas em um mesmo índice de tração (60 Nm·g⁻¹) mostra que, para atingir essa resistência à tração, a polpa de *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01) é a que necessita da menor energia de refino. Por outro lado, a maior energia de refino é demandada pela polpa de *C. citriodora* (CIT 02). A necessidade de refino impacta diretamente os custos de produção do papel, uma vez que se trata de uma etapa com alta demanda de energia.

Neste nível de resistência à tração, as polpas de *C. citriodora* (CIT 02) e *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01 e T x C 02) são as que apresentam as maiores drenabilidades, enquanto que a resistência à passagem do ar é maior para a polpa do híbrido *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02).

Conforme discutido anteriormente, as polpas de *C. citriodora* apresentam alto volume específico, propriedade bastante valorizada pelos fabricantes de papel. A polpa de *C. citriodora* (CIT 01) também apresenta a maior capilaridade e o menor índice de retenção de água dentre todas as polpas avaliadas. A opacidade, outra importante propriedade na fabricação de papéis de imprimir e escrever, é mais alta para as polpas de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) e *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01).

Com o índice de tração constante em 60 Nm·g⁻¹, as polpas de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG), *C. torelliana* (TOR), *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 02) e *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02) apresentam as maiores resistências ao estouro, enquanto que os maiores índices de rasgo são observados para as polpas de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG), *C. citriodora* (CIT 01) e *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 02).

4.7 Dimensionamento de uma fábrica de celulose

Foi realizado o dimensionamento de uma fábrica de celulose com capacidade anual de produção de 1.500.000 toneladas de polpa celulósica branqueada, com abastecimento hipotético de cada um dos oito materiais genéticos avaliados neste trabalho. Assim, pode-se considerar que foram realizados os dimensionamentos de oito fábricas separadamente, uma para cada madeira, levando em consideração as áreas da fábrica previamente selecionadas.

O dimensionamento da área de picagem de toras (volume sólido de madeira por hora) considerando cada uma das oito madeiras é apresentado na Tabela 45.

Tabela 45 – Dimensionamento da área de picagem de toras

Material genético	Capacidade necessária, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Capacidade proporcional a URG, %
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	941	100,0
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	746	79,3
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	752	79,9
<i>C. torelliana</i> - TOR	850	90,3
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	901	95,7
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	924	98,1
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	968	102,8
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	844	89,7

Conforme pode ser observado, o dimensionamento da área de picagem de toras está diretamente relacionado ao consumo específico de madeira e, consequentemente, às densidades básica e aparente da madeira. As maiores capacidades desta área são necessárias para as madeiras de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) e *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01), materiais que apresentam os maiores consumos específicos de madeira e os menores valores de densidade básica e densidade aparente da madeira. As madeiras mais densas (*C. citriodora* – CIT 01 e CIT 02) são as que requerem menor capacidade de picagem de toras, uma vez que apresentam baixo consumo específico e alta densidade básica.

Apesar de reduzir a necessidade de picagem de madeira, o aumento da densidade básica da madeira pode ocasionar um maior desgaste das facas dos picadores, o que implicaria em uma maior necessidade de paradas para troca e afiamento das facas, além da necessidade

de instalação de picadores com motores de maior potência. Porém, esses fatores não foram considerados nesta análise.

As áreas de peneiramento de cavacos, extração de cavacos e alimentação do digestor de uma fábrica de celulose também são afetadas pela densidade básica da madeira. Isso ocorre uma vez que estas áreas devem processar volumes de cavacos condizentes com a massa de madeira necessária para a produção de determinada quantidade de celulose. Assim, o consumo específico de madeira também afeta diretamente o dimensionamento destas áreas. Os dimensionamentos das áreas de peneiramento de cavacos, extração de cavacos e alimentação do digestor (volume aparente de madeira por hora) podem ser observados nas Tabelas 46 e 47, respectivamente.

Tabela 46 – Dimensionamento da área de peneiramento de cavacos

Material genético	Capacidade necessária, m³·h⁻¹	Capacidade proporcional a URG, %
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	2.715	100,0
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	2.140	78,8
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	2.141	78,9
<i>C. torelliana</i> – TOR	2.443	90,0
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	2.582	95,1
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	2.719	100,1
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	2.720	100,2
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	2.439	89,9

Tabela 47 – Dimensionamento das áreas de extração de cavacos e alimentação do digestor

Material genético	Capacidade necessária, m³·h⁻¹	Capacidade proporcional a URG, %
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	2.424	100,0
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	1.911	78,8
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	1.912	78,9
<i>C. torelliana</i> – TOR	2.182	90,0
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	2.306	95,1
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	2.428	100,1
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	2.429	100,2
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	2.179	89,9

O dimensionamento das áreas de peneiramento de cavacos, extração de cavacos e alimentação do digestor segue a mesma tendência observada no dimensionamento da área de picagem de toras, ou seja, as maiores capacidades são necessárias para as madeiras de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) e *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01), materiais que apresentam os maiores consumos específicos de madeira e os menores valores de densidade básica e densidade aparente da madeira. Já as menores capacidades são necessárias na fábrica que utilizaria madeira de *C. citriodora* (CIT 01 e CIT 02), visto que as madeiras desta espécie apresentam alta densidade, com consequente baixo consumo específico de madeira no processo de polpação.

O dimensionamento da área de evaporação, dado pela capacidade de evaporação de água por hora, é apresentado na Tabela 48.

Tabela 48 – Dimensionamento da área de evaporação

Material genético	Capacidade necessária, t·h⁻¹	Capacidade proporcional a URG, %
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	920	100,0
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	930	101,1
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	1.003	109,1
<i>C. torelliana</i> – TOR	988	107,4
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	1.074	116,8
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	1.041	113,2
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	986	107,2
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	970	105,5

A capacidade necessária para a área de evaporação está diretamente relacionada ao rendimento do processo de cozimento e ao teor de sólidos totais do licor negro. Como o dimensionamento considerado no presente trabalho foi realizado para uma fábrica com capacidade de produção anual de 1.500.000 toneladas de celulose, um decréscimo no rendimento do processo de polpação implica na necessidade de maior consumo mássico de madeira. Como a relação licor:madeira utilizada no cozimento leva em consideração um volume de licor aplicado em uma massa de madeira, esse aumento de consumo mássico de madeira resulta em maior aplicação volumétrica de licor de cozimento e, consequentemente, em um maior volume de licor negro gerado. Além disso, considerou-se a concentração do licor até 80% de sólidos em todos os casos, ou seja, quanto menor o teor de sólidos do licor

negro enviado à evaporação, maior a capacidade de evaporação de água necessária nesta área da fábrica.

É possível verificar a necessidade de uma capacidade menor na área de evaporação em fábricas que utilizem as madeiras que resultaram nos melhores rendimentos no processo de polpação no presente trabalho (*E. grandis* x *E. urophylla* – URG e *C. citriodora* – CIT 01). Já as fábricas que utilizem as madeiras de *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01 e T x C 02) seriam as que necessitariam as maiores capacidades nesta área, fato diretamente relacionado aos menores rendimentos destes materiais durante o processo de polpação.

O dimensionamento da área de caldeira de recuperação (capacidade diária de queima de sólidos) pode ser observado na Tabela 49.

Tabela 49 – Dimensionamento da caldeira de recuperação

Material genético	Capacidade necessária, t·dia⁻¹	Capacidade proporcional a URG, %
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	5.210	100,0
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	5.117	98,2
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	6.204	119,1
<i>C. torelliana</i> – TOR	6.044	116,0
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	7.120	136,7
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	6.450	123,8
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	5.984	114,9
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	5.774	110,8

Como resultado do baixo rendimento em celulose e da consequente alta geração de sólidos do cozimento da madeira de *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01), uma fábrica abastecida com esta madeira necessitaria de uma caldeira de recuperação com a maior capacidade dentre todos os cenários avaliados (36,7% maior que a caldeira de recuperação de uma fábrica abastecida com *E. grandis* x *E. urophylla*). Já a menor capacidade da caldeira de recuperação é observada para a fábrica abastecida com a madeira de *C. citriodora* (CIT 01), reflexo do alto rendimento e consequente baixa geração de sólidos de seu cozimento.

A caustificação é a área responsável pela produção de licor branco em uma fábrica de celulose. Sua capacidade é dada pela massa diária necessária de álcali ativo e, desta forma, a demanda de álcali para o cozimento da madeira impacta diretamente nesta área da fábrica. Os dimensionamentos da área de caustificação são apresentados na Tabela 50.

Tabela 50 – Dimensionamento da área de produção de licor branco - caustificação

Material genético	Capacidade necessária, t·dia⁻¹	Capacidade proporcional a URG, %
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	1.672	100,0
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	1.586	94,8
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	2.007	120,0
<i>C. torelliana</i> – TOR	2.012	120,3
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	2.427	145,2
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	2.210	132,2
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	1.963	117,4
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	1.921	114,9

Como resultado da alta demanda de álcali para o cozimento das madeiras dos híbridos *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01 e T x C 02), a área de caustificação das fábricas abastecidas com estes materiais seriam aquelas com as maiores capacidades necessárias dentre todos os materiais avaliados. Já a fábrica abastecida com madeira de *C. citriodora* (CIT 01) é aquela cuja área de caustificação seria a menor, uma vez que esta madeira é a que demandou menor carga alcalina no processo de cozimento.

O dimensionamento das oito fábricas de celulose, abastecidas com cada material genético individualmente, é apresentado na Tabela 51.

Tabela 51 – Dimensionamento de uma fábrica de celulose com capacidade de produção de 1.500.000 toneladas de polpa celulósica branqueada

Parâmetro	URG	CIT 01	CIT 02	TOR	T x C 01	T x C 02	C x T 01	C x T 02
Picagem de toras, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	941	746	752	850	901	924	968	844
Peneiramento de cavacos, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	2.715	2.140	2.141	2.443	2.582	2.719	2.720	2.439
Extração de cavacos e alimentação do digestor, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	2.424	1.911	1.912	2.182	2.306	2.428	2.429	2.179
Evaporação, $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	920	930	1.003	988	1.074	1.041	986	970
Caldeira de Recuperação, $\text{t} \cdot \text{dia}^{-1}$	5.210	5.117	6.204	6.044	7.120	6.450	5.984	5.774
Caustificação, $\text{t} \cdot \text{dia}^{-1}$	1.672	1.586	2.007	2.012	2.427	2.210	1.963	1.921

Conforme já apresentado e discutido, as fábricas abastecidas com as madeiras dos híbridos que possuem a espécie *C. torelliana* como genitor feminino (*C. torelliana* x *C. citriodora*) necessitariam de áreas com maiores capacidades, resultado dos baixos rendimentos em polpa celulósica e alta geração de sólidos destes materiais. Pode-se verificar na análise apresentada neste trabalho que as características da madeira e as diversas variáveis de cozimento influenciam no dimensionamento de uma fábrica de celulose, com destaque para os itens abaixo:

- densidade básica da madeira;
- densidade aparente da madeira;
- necessidade de álcali no processo de polpação;
- relação licor:madeira;
- rendimento do processo de cozimento;
- consumo específico de madeira;
- teor de sólidos gerados;
- teor de sólidos no licor negro.

Com base nos resultados obtidos neste trabalho e considerando a variabilidade dos materiais genéticos avaliados, pode-se inferir que o aumento da densidade básica da madeira que abastece uma fábrica de celulose apresenta os seguintes impactos em uma fábrica de celulose:

- necessidade de capacidade de picagem de toras menor, pelo menor consumo específico de madeira;
- necessidade de capacidade de peneiramento de cavacos menor, pelo menor consumo específico de madeira;
- menores capacidades de extração de cavacos e alimentação do digestor, pelo menor consumo específico de madeira;
- maior capacidade na evaporação de licor negro, pela maior geração volumétrica de licor.

Os dados apresentados no dimensionamento de uma fábrica de celulose levaram em consideração os resultados dos testes laboratoriais realizados no presente trabalho, sendo que em uma fábrica há diversas outras variáveis que não são consideradas em testes em laboratório. Assim, os valores de capacidade das áreas que foram apresentados poderiam sofrer ajustes em uma fábrica real. Apesar disso, a diferença proporcional no dimensionamento das áreas com a variação de madeira observada neste trabalho seria a

mesma em uma fábrica real, permitindo a avaliação do impacto de cada material genético no dimensionamento de uma fábrica de celulose.

Outro parâmetro de fundamental importância para fábricas de celulose é a área florestal plantada. No presente trabalho, a área florestal necessária para a fabricação anual de 1.500.000 toneladas de celulose foi calculada levando em consideração o IMA (incremento médio anual), o consumo específico de madeira e o ciclo de corte de cada material genético avaliado. Neste trabalho, considerou-se como ciclo de corte a idade dos materiais analisados, ou seja, 6 anos para a madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG), 8 anos para a madeira de *C. citriodora* (CIT 01) e 7 anos para os quatro híbridos de *C. citriodora* e *C. torelliana*. Não foi possível avaliar a área plantada necessária para abastecer uma fábrica de celulose com as espécies *C. citriodora* (CIT 02) e *C. torelliana* (TOR), uma vez que não há dados de inventário destes materiais. Os resultados da área florestal plantada total e área florestal plantada anualmente são apresentados na Tabela 52.

Tabela 52 – Área florestal total, proporcional ao material de referência e anual necessária para abastecer uma fábrica com produção de 1.500.000 toneladas de polpa celulósica

Material genético	Área florestal, ha	Área proporcional a URG, %	Rotação, anos	Área anual, ha·ano⁻¹
URG	205.729	100,0	6	34.288
CIT 01	209.645	101,9	8	26.206
T x C 01	416.030	202,2	7	59.433
T x C 02	251.258	122,1	7	35.894
C x T 01	330.709	160,7	7	47.244
C x T 02	190.509	92,6	7	27.216

O híbrido *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01) se destaca negativamente por apresentar alto consumo específico de madeira e baixo incremento médio anual. Consequentemente, a área florestal plantada necessária para abastecer uma fábrica de celulose com esta madeira seria a maior dentre os materiais avaliados. Já o híbrido *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02) apresenta a maior produtividade florestal e consumo específico de madeira intermediário sendo, desta forma, o material com menor área plantada necessária para abastecimento de uma fábrica de celulose, possibilitando a redução dos custos com aquisição de terras, plantio, manutenção das áreas plantadas, colheita, transporte de madeira e mão-de-obra.

É importante ressaltar que os materiais genéticos avaliados neste trabalho foram plantados em diferentes regiões, cujas características edofoclimáticas são distintas entre si. Essas variações nos locais dos plantios podem resultar em diferentes características da madeira, inclusive diferenças de densidade básica, o que apresenta impacto direto no processo de polpação. Neste sentido, seria importante a avaliação destes materiais genéticos plantados em uma mesma região.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho é possível concluir que:

- As madeiras de *C. citriodora* são as mais densas dentre todos os materiais avaliados, enquanto a menor densidade básica foi encontrada para a madeira de *E. grandis* x *E. urophylla*, utilizada como referência tecnológica neste trabalho;

- A madeira do híbrido *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02) foi a que apresenta as melhores características químicas para processos de polpação, com baixos teores de lignina e extrativos, além de alto teor de holocelulose. O baixo teor de lignina é uma característica das espécies e híbridos de *Corymbia*, observada em todos os materiais genéticos deste gênero avaliados neste trabalho;

- A madeira de *C. citriodora* com 18 anos de idade (CIT 02) é a que apresenta as características químicas menos favoráveis para a produção de celulose, com alto teor de extrativos e baixo teor de holocelulose;

- As fibras de todos os materiais avaliados de *C. citriodora*, *C. torelliana* e seus híbridos apresentam, em comparação às fibras do material de referência (*E. grandis* x *E. urophylla*), maior comprimento, menor largura, menor diâmetro do lume, maior espessura de parede e maior fração parede;

- As madeiras de *C. citriodora* (CIT 01) e do material de referência, *E. grandis* x *E. urophylla* (URG), são os que apresentam os maiores rendimentos depurados no processo kraft de polpação. Os menores rendimentos foram observados para as madeiras dos híbridos de *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01 e T x C 02);

- As madeiras de *C. citriodora* (CIT 01 e CIT 02), as mais densas dentre as analisadas, são as que apresentam os menores consumos específicos de madeira;

- As polpas de todos os materiais avaliados de *C. citriodora*, *C. torelliana* e seus híbridos apresentam, em comparação à polpa do material de referência (*E. grandis* x *E. urophylla*), maior eficiência na deslignificação com oxigênio;

- As polpas de *C. citriodora* com 8 anos de idade (CIT 01) e do material de referência, *E. grandis* x *E. urophylla* (URG), são os que apresentam as menores demandas de reagentes químicos no branqueamento;

- As polpas branqueadas da espécie *C. citriodora* (CIT 01 e CIT 02) apresentam alto volume específico, baixa resistência à passagem do ar, alta capilaridade, baixo índice de

retenção de água e alta resistência ao rasgo, características que indicam a polpa desta espécie para a produção de papéis de alta absorção (*tissue*);

- As polpas de *E. grandis* x *E. urophylla* (URG) e *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01) se destacam por apresentar as maiores resistências à tração, rasgo e estouro;

- No dimensionamento de uma fábrica de polpa celulósica que utilize as madeiras dos híbridos de *C. citriodora* e *C. torelliana* que apresentam a espécie *C. torelliana* como genitor feminino (*C. torelliana* x *C. citriodora*), deve ser dada especial atenção às áreas de evaporação, caldeira de recuperação e caustificação;

Os resultados obtidos neste trabalho permitem inferir que a densidade básica da madeira não é um fator limitante para o processo Lo-Solids[®] de polpação na faixa de densidade básica avaliada neste trabalho (de 0,451 a 0,616 g·cm⁻³). Nessas condições, a utilização de madeiras de alta densidade básica para a produção de polpa celulósica é possível, resultando em bons níveis de rendimento e baixo consumo específico de madeira.

Dentre os materiais analisados, é recomendada a utilização, para a produção de celulose, das madeiras de *C. citriodora* com 8 anos de idade (CIT 01) e dos híbridos de *C. citriodora* e *C. torelliana* que apresentam a espécie *C. citriodora* como genitor feminino (*C. citriodora* x *C. torelliana*). A polpação destes materiais resulta em bons rendimentos, baixo consumo específico de madeira e boa branqueabilidade da polpa produzida.

Já os híbridos que apresentam a espécie *C. torelliana* como genitor feminino (*C. torelliana* x *C. citriodora*) não apresentaram bons resultados frente ao processo de polpação com as condições utilizadas neste trabalho, resultando em baixos rendimentos em celulose e baixa branqueabilidade da polpa.

Com base nos resultados deste trabalho, pode-se afirmar que as condições de cozimento, deslignificação e branqueamento devem ser otimizadas para cada material genético, com o objetivo de maximizar os rendimentos e a qualidade da polpa celulósica produzida.

Considerando a produtividade florestal, características tecnológicas, desempenho no processo de produção de celulose, características da polpa branqueada e o impacto no dimensionamento de uma fábrica de celulose de todos os materiais genéticos avaliados neste trabalho, foi elaborado o seguinte ranking de recomendação dos materiais para produção de celulose: 1) *C. citriodora* (CIT 01); 2) *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02); 3) *E. grandis* x *E. urophylla* (URG); 4) *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01); 5) *C. citriodora* (CIT 02); 6) *C. torelliana* (TOR); 7) *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 02); 8) *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 01).

6 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para futuros trabalhos com madeira de espécies e/ou híbridos do gênero *Corymbia* para a produção de polpa celulósica, sugere-se:

- avaliação dos tipos de lignina da madeira, da polpa não branqueada e da polpa deslignificada com oxigênio;
- avaliação dos carboidratos da madeira e polpa;
- otimização das condições de cozimento;
- otimização das condições de deslignificação com oxigênio;
- otimização das condições de branqueamento.
- avaliar a produtividade dos diferentes materiais quando plantados em uma mesma região, ou seja, nas mesmas condições edafoclimáticas;
- avaliar o impacto das condições edafoclimáticas nas características tecnológicas da madeira, principalmente na densidade básica.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, G.S.B. **Estudo da qualidade da madeira para produção de polpa celulósica relacionada à precocidade na seleção de um Híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla***. 2002. 73 p. Dissertação (Mestrado em Recursos 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 eucaliptos**. 2003. 115 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- ALMEIDA, F.S.; SILVA JR., F.G. Influência da carga alcalina no processo de polpação Lo-Solids® para madeira de eucalipto. In: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 37., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 2004. 23 p.
- ALZATE, S.B.A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *urophylla***. 2004. 151 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- ALZATE, S.B.A.; TOMAZELLO FILHO, M.; PIEDADE, S.M.S. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. e *E. grandis* x *urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 68, p. 87–95, 2005.
- ANDRADE, M.F.; COLODETTE, J.L. Influência do último estágio de branqueamento ECF, na branqueabilidade, no refino e nas propriedades da polpa. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 143-150, 2011.
- ARAUJO, H.J.B. **Agrupamento das espécies madeireiras ocorrentes em pequenas áreas sob manejo florestal do Projeto de Colonização Pedro Peixoto (AC) por similaridade das propriedades físicas e mecânicas**. 2002. 168p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- ASHE, C.; HERBISON-EVANS, D. **Caterpillars (and butterflies and moths) of Australia**. 2009. Disponível em: <<http://lepidoptera.butterflyhouse.com.au/plants/myrt/angophora-costata.html>>. Acesso em: 21 nov. 2014.
- ASSIS, T.F. Production and use of *Eucalyptus* hybrids for industrial purposes. In: FRI/CRC-SPF SYMPOSIUM, 2000, Noosa. **Hybrid breeding and genetics of forest trees: proceedings...** Brisbane: Department of Primary Industries, 2000. p. 63-75.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- _____. **NBR 14345**: pasta celulósica – refinação em laboratório – método PFI. Rio de Janeiro, 2004. 10 p.
- _____. **NBR – NM – ISO**: métodos de provas. Rio de Janeiro, 2009. 109 p.

ASSUMPCÃO, R.M.V.; PINHO, M.R.R.; CAHEN, R.; PHILIPP, P. Polpação química. In: D'ALMEIDA, M.L.O. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. São Paulo: SENAI; IPT, 1988. v. 1, cap. 6, p. 169–319.

AUSTRALIAN NATIVE PALANTS SOCIETY. *Eucalyptus, Corymbia and Angophora*: background. Disponível em: <<http://anpsa.org.au/eucall1a.html>>. Acesso em: 21 nov. 2014.

BARRICHELO, L.E.G. Densidade básica, teor de holocelulose e rendimento de celulose de madeiras de *Eucalyptus grandis*. **Silvicultura**, São Paulo, v. 8, n. 32, p. 802-808, 1983.

BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O. Potencialidade de espécies tropicais de eucalipto para a produção de celulose sulfato branqueada. **IPEF**, Piracicaba, n. 3, p. 9–38, 1976.

_____. Variabilidade longitudinal e radial da madeira de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 17., 1984, São Paulo, **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1984. p. 403-409.

BASSA, A. **Processo de polpação kraft convencional e modificado com madeiras de *E. grandis* e Híbrido (*E. grandis* x *E. urophylla*)**. 2002. 103 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

BASSA, A.G.M.C. **Misturas de madeiras de *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* para produção de celulose kraft através do Processo Lo-Solids®**. 2006. 168 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

BENJAMIN, C.A. **Estudo da estrutura anatômica e das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Corymbia (Eucalyptus) citriodora* e *Eucalyptus grandis***. 2006. 180 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2006.

BONFATTI JÚNIOR, E.A. **Deslignificação com oxigênio para polpa kraft com alto número kappa**. 2014. 115 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

BOWYER, J.L.; SHMULSKY, R.; HAYGREEN, J.G. **Forest products and wood science: an introduction**. Ames: Blackwell Publishing, 2007. 558 p.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Correlações entre características químicas da madeira para a produção de carvão vegetal: I. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **IPEF**, Piracicaba, n. 14, p. 9–20, 1977.

BROCCO, V.F.; LOIOLA, P.L.; PAES, J.B.; OLIVEIRA, J.T.S. Efeito do tempo e da pressão de tratamento nas propriedades mecânicas das madeiras de eucalipto. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 8, n. 15, p. 777–787, 2012.

BURGER, M.L.; RITCHER, H.G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 151 p.

CAMERON, J.; KICK, C. Causticizing as a mass transfer limited reaction and implications. In: 2012 PEERS CONFERENCE, 2012, Savannah. **Proceedings...** Atlanta: TAPPI, 2012. p. 1667 - 1689.

CARVALHO, M.G.V.S. **Efeito das variáveis de cozimento nas características químicas de pastas kraft de *Eucalyptus globulus***. 1999. 282 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 1999.

CASEY, J.P. **Casey's reports on paper and the paper industry**: report no. 1 - chemical and mechanical pulping. New York: Marcel Dekker, 1984. 136 p.

CASTRO, V.R. **Efeitos do potássio, sódio e da disponibilidade hídrica no crescimento e qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**. 2014. 114 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

CAZAL, C.M. **Métodos de quantificação de grupos carboxílicos e carbonílicos em polpa de celulose kraft branqueada**. 2006. 121p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

CLIMATE-DATA. Disponível em: <<http://climate-data.org>>. Acesso em: 20 jan. 2014.

COELHO, G.A.; WEINSCHUTZ, R.; DALLAVALLI, M.J.; MATHIA, A.L. Fotodegradação heterogênea de efluente de polpa kraft branqueada com cloro. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 5, p. 927-934, 2014.

COLODETTE, J.L.; LOGUE JÚNIOR, D.; PEDRAZZI, C.; COLODETTE, L.C.; GOMIDE, J.L.; GOMES, C.M. The true importance of oxygen delignification for eucalyptus kraft pulps. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM OF EUCALYPTUS PULP, 3., 2007, Belo Horizonte. **Proceedings...** Viçosa: UFV, 2007. p. 1-11.

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. 62, n. 5, p. 75-85, 2001.

COSTA, M.M.; COLODETTE, J.L.; GOMIDE, J.L.; FOELKEL, C.E.B. Avaliação preliminar do potencial de quatro madeiras de eucalipto na produção de polpa solúvel branqueada pela sequência OA(ZQ)P. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 21, p. 385-392, 2007.

COSTA, M.M.; OLIVEIRA, M.J.; SANTOS, C.A.; LEPORINI FILHO, C. Efeito do fator kappa na estabilidade de alvura de polpas kraft branqueada de *Eucalyptus* spp. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM OF EUCALYPTUS PULP, 1., 2003, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 2003. 10 p.

D'ALMEIDA, M.L.O.; TAKAHASHI, R.C.T.; KOGA, M.E.T. **Propriedades do papel e controle de qualidade**. São Paulo: IPT, Agrupamento Celulose e Papel, 2004. 113 p.

DEMUNER, B.J.; DORIA, E.L.V.; SILVA JÚNIOR, E.C.; MANFREDI, V. As propriedades do papel e as características das fibras de Eucalipto. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 24., 1991, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1991. p. 621-641.

DUARTE, F.A.S. **Avaliação da madeira de *Betula pendula*, *Eucalyptus globulus* e de híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* destinadas à produção de polpa celulósica kraft.** 2006. 107 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

FANTUZZI NETO, H. **Qualidade da madeira de eucalipto para a produção de celulose kraft.** 2012. 105 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood:** chemistry, ultrastructure, reactions. Berlin: Walter de Gruyter, 1989. 613 p.

FERNANDES, D.E.; GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; FERREIRA, M.Z. Influência da produtividade de clones híbridos de eucalipto na densidade da madeira e na polpação Kraft. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 143-150, 2011.

FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de povoamentos comerciais de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden nas idades de 11, 12, 13, 14 e 14 anos. **IPEF**, Piracicaba, n. 4, p. 65-89, 1972.

FERREIRA, P.J. HENRIQUES, R.A.; FIGUEIREDO, M.M. Influência dos finos da refinação nas propriedades de pastas kraft de *Eucalyptus globulus*. In: ENCONTRO NACIONAL DA TECNCELPA, 18., 2001, Figueira da Foz. **Anais...** Figueira da Foz: Tecnicelpe, 2001. 9 p.

FOELKEL, C.E.B. Casca da árvore do eucalipto: Aspectos morfológicos, fisiológicos, florestais, ecológicos e industriais, visando a produção de celulose e papel. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, 2005. 109 p. Disponível em: <<http://www.eucalyptus.com.br>>. Acesso em: 14 jan. 2013.

_____. As fibras dos eucaliptos e as qualidades requeridas na celulose kraft para fabricação de papel. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, 2007. 48 p. Disponível em: <<http://www.eucalyptus.com.br>>. Acesso em: 03 abr. 2015.

_____. Propriedades papeleiras das árvores, madeiras e fibras celulósicas dos eucaliptos. 2009. 111p. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**. Disponível em: <http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT14_PropPapeleiras.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2015.

FOELKEL, C.E.B.; BARRICHELO, L.E.G.; MILANEZ, A.F. Estudo comparativo das madeiras de *Eucalyptus saligna*, *E. paniculata*, *E. citriodora*, *E. maculata* e *E. tereticornis* para a produção de celulose sulfato. **IPEF**, Piracicaba, n. 10, p. 17–37, 1975.

FOELKEL C.E.B.; BRASIL, M.A.M.; BARRICHELO, L.E.G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **IPEF**, Piracicaba, n. 2/3, p. 65–74, 1971.

FOELKEL, C.E.B.; MORA, E.; MENOCELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice da qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. **O Papel**, São Paulo, v. 53, n. 5, p. 35-40, 1992.

FORESTRY COMPENDIUM. Disponível em: <<http://www.cabi.org/fc>>. Acesso em: 26 fev. 2014.

FORSSKÄHL, I. **Papermaking science and technology**. Atlanta: Tappi, 2000. 350 p.

FRAGA, D.G.; SILVA JR., F.G.; GONÇALEZ, J.C. Avaliação da polpação soda de *Pinus taeda* com adição de antraquinona. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN EM CELULOSE Y PAPEL, 1., 2002, Campinas. **Anais...** Campinas: USP, Escola Politécnica, 2002. 9 p.

GARCIA, E.A.; LANÇAS, K.P.; GUERRA, S.P.S.; MACHADO, F.C.; MAZIERO, F.L. Densidade básica média e biomassa da madeira em floresta energética no sistema de curta rotação. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, 6., 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Remade, 2011. 4 p.

GARDNER, R.A.W.; LITTLE, K.M.; ARBUTHNOT, A. Wood and fiber productivity potential of promising new eucalypt species for coastal Zululand, South Africa. **Australian Forestry**, Melbourne, v. 70, n. 1, p. 37-47, 2007.

GOMES, F.A. **Avaliação dos processos kraft convencional e Lo-Solids® para madeira de Pinus taeda**. 2009. 99 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

GOMES, F.J.B.; COLODETTE, J.L.; MOUNTEER, A.H.; BATALHA, L.A.R. O estado da arte do branqueamento de polpa celulósica de eucalipto. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 45., 2012, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 2012. 13 p.

GOMES, F.J.B.; GOUVÊA, A.F.G.; COLODETTE, J.L.; GOMIDE, J.L.; CARVALHO, A.M.M.L.; TRUGILHO, P.F.; GOMES, C.M.; ROSADO, A.M. Influência do teor e da relação S/G da lignina da madeira no desempenho da polpação Kraft. **O Papel**, São Paulo, v. 69, p. 95-105, 2008.

GOMIDE, J.L. **Polpa de celulose: química dos processos alcalinos de polpação**. Viçosa: UFV, 1979. 50 p.

GOMIDE, J.L.; OLIVEIRA, R.C.; COLODETTE, J.L. Produção de polpa kraft de eucalipto, com adição de antraquinona. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 4, n. 2, p. 203-214, 1980.

GOMIDE, J.L.; VIVONE, R.R.; MARQUES, A.R. Utilização do processo soda/antraquinona para produção de celulose branqueável de *Eucalyptus* spp. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABCP, 20., 1987, São Paulo. **Trabalhos publicados...** São Paulo: ABCP, 1987. p. 35-42.

GRACE, T.M. Chemical recovery from concentrated liquor. In: HOUGH, G.W. **Chemical recovery in the alkaline pulping process**. Atlanta: TAPPI, 1985. chap. 4, p. 87-190.

GOOGLE MAPS. Disponível em: <<http://maps.google.com>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

GULLICHSEN, J. Fiber line operations. In: GULLICHSEN, J.; FOGELHOLM, C. **Chemical pulping**. Jyväskylä: Gummerus Printing. 1999. p. A-18-A243.

HILL, K.D.; JOHNSON, L.A.S. Systematic studies in the eucalypts 7. A revision of the bloodwoods, genus *Corymbia* (Myrtaceae). **Telopea**, Sydney, v. 6, n. 2/3, p. 185-504, 1995.

HOUGH, G.W. Principles of chemical recovery. In: _____. **Chemical recovery in the alkaline pulping process**. Atlanta: TAPPI, 1985. chap. 2, p. 9-13.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Cenários IBÁ**: estatísticas da indústria brasileira de árvores. Brasília, 2014. 8 p. Disponível em: <http://www.bracelpa.org.br/shared/destaque/cenarios_julho_imprensa.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2014.

JACOB, W.S.; BALLONI, E.A. Efeitos da fertilização na qualidade da madeira. **Boletim Informativo IPEF**, Piracicaba, v. 6, n. 20, p. C1-C13, 1978.

JOHNSTON, B. **A close-up view of *Eucalyptus* tree flowers**. 2007. Disponível em: <<http://www.microscopy-uk.org.uk/mag/indexmag.html?http://www.microscopy-uk.org.uk/mag/artoct07/bj-eucalyptus.html>>. Acesso em: 21 nov. 2014.

KLEPPE, P.J. Kraft pulping. **TAPPI Journal**, Atlanta, v. 53, n. 1, p. 35-47, 1970.

KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ, W.A. **Principles of wood science and technology**: solid wood. New York: Springer Verlag, 1968. v. 1, 592 p.

LAAKSO, S. **Modeling of chip bed packing in a continous kraft cooking digester**. 2008. 142 p. Thesis (Doctor in Science and Technology) - Helsinki University of Technology, Espoo, 2008.

LI, J.; GELLERSTEDT, G. On the structural significance of Kappa number measurement. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM WOOD PULPING CHEMICAL, 1997, Montreal. **Proceedings...** Montreal: TAPPI, 1997. p. 56-71.

LEPAGE, E.S. Química da madeira. In: _____. **Manual de preservação de madeiras**. 2. ed. São Paulo: IPT, 1986. cap. 4, p. 69-98.

LONGUE JÚNIOR, D.; COLODETTE, J.L. Remoção de hemiceluloses da madeira por tratamento de auto hidrólise. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 541-550, 2011.

LORENZI, H.; SOUZA, H.M.; TORRES, M.A.V.; BACHER, L.B. **Árvores exóticas no Brasil**: madeireiras, ornamentais e aromáticas. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2003. 352 p.

MACHADO, F.J.J.; GOMIDE, J.L.; CAMPOS, W.O.; CAPITANI, L.R. **Estudo comparativo das madeiras de *Eucalyptus torrelliana* e *Eucalyptus grandis* para produção de polpa kraft**. Belo Horizonte: Cenibra Florestal, 1986. 19 p.

MANFREDI, M.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C.; BARBOSA, B.M. Efeitos da sequência de branqueamento na ação de alvejantes óticos em celulose kraft de eucalipto. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 223-230, 2014.

MARCOCCIA, B.S.; STROMBERG, B.; PROUGH, J.R. Achieving major increases in hardwood yield with Lo-Solids®. In: BREAKING THE PULP YIELD BARRIER SYMPOSIUM, 1998, Atlanta. **Proceedings...** Atlanta: TAPPI, 1998. p. 79-89.

MENEGAZZO, M.L. **Características morfológicas de celuloses branqueadas de Pinus e Eucalyptus em analisador óptico automático de fibras**. 2012. 65 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Botucatu, 2012.

MENESES, R.F. **Modelagem do Sistema de recuperação do licor de cozimento na produção de celulose**. 2005. 23 p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MEZZOMO, L.X. **Potencialidade de *Eucalyptus cloeziana* S. Muell, *E. citriodora* Hook, *E. urophylla* St Blake e *E. urophylla* x *E. grandis*, cultivados na Bahia, para a produção de celulose solúvel**. 1996. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1996.

MILAGRES, F.R. **Avaliação da madeira de híbridos de *Eucalyptus globulus* com *E. grandis* e *E. urophylla*, para produção de celulose, utilizando espectroscopia nir**. 2009. 142 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

MIRANDA, C.R.; BARRICHELO, L.E.G. Celulose de madeira de *E. citriodora*: influência do tamanho de cavacos. In: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP, 23., 1990, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1990. p. 1-34.

MIRANDA, G.M. **Análise econômica de dois sistemas de descascamento de madeira de eucalipto**. 2000. 57 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

MOKFIENSKI, A.; COLODETTE, J.L.; GOMIDE, J.L.; CARVALHO, A.M.M.L. A importância relativa da densidade da madeira e do teor de carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 3, p. 401-413, 2018.

MORAES, F.A.B. **Modelo para avaliação do consumo específico de madeira e insumos energéticos no processo de produção de celulose e papel**. 2011. 212 p. Dissertação de (Mestrado em Engenharia de Produção) - Centro Universitário de Araraquara, Araraquara, 2011.

MOUTINHO, V.H.P. **Influência da variabilidade dimensional e da densidade da madeira de *Eucalyptus* sp. e *Corymbia* sp. na qualidade do carvão**. 2013. 164 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

OLIVEIRA, J.T.S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. 1997. 429 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

OLIVEIRA, J.T.S.; SILVA, J.C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 381–385, 2003.

OLIVEIRA, J.T.S.; HELLMEISTER, J.C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica da madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n.1, p. 115–127, 2005.

OLIVEIRA, J.T.S.; HELLMEISTER, J.C.; SIMÕES, J.W.; TOMAZELLO FILHO, M. Caracterização da madeira de sete espécies de eucaliptos para a construção civil: 1- avaliações dendrométricas das árvores. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 56, p. 113-124, 1999.

PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. New York: Mc Graw-Hill Book, 1970. 705 p.

_____. **Textbook of wood technology**. New York: Mc Graw-Hill Book, 1980. 722 p.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113 p. (Documentos, 38).

PIMENTA, L.R.; GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; SHIN, N.H. Comportamento dos constituintes químicos da madeira de eucalipto na polpação Lo-Solids®. In: COLÓQUIO INTERNACIONAL SOBRE CELULOSE KRAFT DE EUCALIPTO, 3., 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Viçosa: UFV, 2007. 14 p.

PINHO, M.R.R.; CAHEN, R. Polpação química. In: SERVIÇO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Celulose e papel**: tecnologia de fabricação da pasta celulósica. São Paulo: SENAI; IPT, 1981. v. 1, cap. 4, p. 165–315.

PRINSEN, P.; RENCORET, J.; GUTIÉRREZ, A.; LIITA, T.; TAMMINEN, T.; COLODETTE, J.L.; BERBIS, M.A.; JIMÉNEZ-BARBERO, J.; MARTÍNEZ, A.T.; DEL RIO, J.C. Modification of the lignin structure during alkaline delignification of eucalyptus wood by kraft, soda-AQ, and soda-O₂ cooking. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, Washington, n. 52, p. 15702–15712, 2013.

QUEIROZ, S.C.S.; GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake clones. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 901-909, 2004.

REIS, C.A.F.; ASSIS, T.F.; SANTOS, A.M.; PALUDZYSZYN FILHO, E. **Corymbia citriodora**: estado da arte de pesquisas no Brasil. Colombo: Embrapa Florestas, 2013. 59 p.

_____. **Corymbia torelliana**: estado da arte de pesquisas no Brasil. Colombo: Embrapa Florestas, 2014. 50 p.

ROZEFELDS, A.C. *Eucalyptus* phylogeny and history: a brief summary. **Tasforests**, Hobart, v. 8, p. 15-26, 1996.

RUY, O.F. **Variação da qualidade da madeira em clones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake da Ilha de Flores, Indonésia**. 1998. 69 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

RYDHOLM, S.A. **Pulping processes**. New York: Interscience, 1965. 1269 p.

SANTINI JUNIOR, L.; LIMA, I.L.; BUFOLO, A.; MOURA, A.E.; BIBINI, G.; LONGUI, E.L.; FLORSHEIM, S.M.B. Densidade básica e dimensões celulares, em diferentes espécies de *Eucalyptus* L'Herit., plantadas em Itatinga/SP. **IF Série Registros**, São Paulo, n. 42 p. 15–21, 2010.

SANTOS, S.R. **Influência da qualidade da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e do processo kraft de polpação na qualidade da polpa**. 2005. 178 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SANTOS, S.R.; SANSÍGOLO, C.A. Influência da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* na qualidade da polpa branqueada. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 1, p. 53-63, 2007.

SCHMIDT, F. **Polpação kraft de cavacos de espessura reduzida**. 2014, 131 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

SEGURA, T.E.S. **Avaliação das madeiras de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Acacia mearnsii* para a produção de celulose kraft pelos processos convencional e Lo-Solids®**. 2012. 99 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

SEGURA, T.E.S.; SILVA JR., F.G. Influência do fator H e da carga alcalina na polpação kraft de *Corymbia citriodora*. In: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, 6.; SIMPÓSIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA DO RJ, 2., 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UFRRJ, 2010. 3 p.

SEGURA, T.E.S.; ZANÃO, M.; SILVA JR., F.G. Potencial da madeira de acácia para a produção de polpa celulósica kraft. In: ENCONTRO NACIONAL DA TECNCELPA, 21.; VI CIADICYP 2010, 6., 21, Lisboa. **Anais...** Lisboa: Tecnicelpe, 2010. 8 p.

SEGURA, T.E.S.; ZANÃO, M.; SANTOS, J.R.; SILVA JR., F.G. Kraft pulping of the main hardwoods used around the world for pulp and paper production. In: 2012 TAPPI PEERS CONFERENCE, 2012, Savannah. **Proceedings...** Savannah: TAPPI, 2012. 8 p.

SEIXAS, F.; BAUCH, S.C.; OLIVEIRA JR., E.D. Balanço energético e econômico de duas alternativas de descascamento de madeira de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 67, p. 37-43, 2005.

SEVERO, E.T.; SANSÍGOLO, C.A.; CALONEGO, F.W.; BARREIROS, R.M. Kraft pulp from juvenile and mature woods of *Corymbia citriodora*. **Bioresources**, Raleigh, v. 8, n. 2, p. 1657-1664, 2013.

SHIMOYAMA, V.R.S.; BARRICHELO, L.E.G. Influência de características anatômicas e químicas sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus* spp. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 24., 1991, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1991. p. 178-183.

SILVA JR., F.G. **Efeito do ritmo de produção sobre a eficiência de processos modificados de polpação para *Eucalyptus grandis* e *Populus tremuloides***. 2005. 144 p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SILVA JR., F.G.; McDONOUGH, T.J. Polpação Lo-Solids® de eucalipto: efeito do ritmo de produção. **O Papel**, São Paulo, v. 63, n. 1, p. 69-81, 2002.

SILVA JR., F.G.; MUNER, J.C.G.; VALLE, C.F. Programa de qualidade da madeira da Votorantim Celulose e Papel VCP. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 28., 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1995. p. 515-519.

SILVA, M.G. **Produtividade, idade e qualidade da madeira de *Eucalyptus* destinada à produção de polpa celulósica branqueada**. 2011. 94 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SINGH, R.P. Principles of pulp bleaching. In: _____. **The bleaching of pulp**. Atlanta: TAPPI Press, 1979. chap. 2, p. 15–28.

SKAAR, C. Wood water relationships. In: ROWELL, R.M. (Ed.). **The chemistry of solid wood**. Washington: American Chemistry Society, 1984. p. 127–172.

SMOOK, G.A. **Handbook for pulp & paper technologists**. Vancouver: Angus Wide Publ., 1994. 429 p.

SOUZA, F.M.L. **Estudo comparativo da madeira e polpação de *Eucalyptus urophylla* e do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* em dois modelos silviculturais**. 2012. 83 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Neto”, Botucatu, 2012.

STURION, J.A.; PEREIRA, J.C.D.; ALBINO, J.C.; MORITA, M. Variação da densidade básica da madeira de doze espécies de *Eucalyptus* plantadas em Uberaba, MG. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Curitiba, n. 14, p. 28-38, 1987.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. **Test methods**. Atlanta: TAPPI Press, 2007. 2 v.

TRAN, H.; VAKKILAINEN, E.K. **The kraft chemical recovery process: TAPPI short course**. St. Petersburg: TAPPI Press, 2008. 8 p.

TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; MENDES, L.M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.

TRUGILHO, P.F.; SILVA, D.A.; FRAZÃO, F.J.L.; MATOS, J.L.M. Comparação de métodos de determinação da densidade básica em madeira. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 20, p. 307–319, 1990.

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

VENTORIM, G., OLIVEIRA, K.D.; COLODETTE, J.L.; COSTA, M.M. Effect of pulp kappa number, lignin and hexenuronic acid contents on oxygen delignification performance. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 71, p. 87-97, 2006.

VIEIRA, I.G. **Estudo de caracteres silviculturais e de produção de óleo essencial de progênies de *Corymbia citriodora* (Hook) K. D. Hill & L. A. S. Johnson procedente de Anhembi-SP-Brasil, ex. Atherton QLD – Austrália**. 2004. 100 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

VILAS BÔAS, O.; MAX, J.C.M.; MELO, A.C.G. Crescimento comparativo de espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* no município de Marília, SP. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 63-72, jun. 2009.

VIVIAN, M.A. **Aumento da eficiência do processo kraft de polpação a partir de pré-tratamento de cavacos de madeira de eucalipto**. 2015. 125 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

WALLIS, A.F.A.; WEARNE, R.H.; WRIGHT, P.J. Analytical characteristics of plantation eucalypt woods relating to kraft pulp yields. **Appita Journal**, Victoria, v. 49, n. 6, p. 427-432, 1996.

WANG, L.; TESSIER, J.C.; ENGLEZOS, P. Thermodynamics and kinetics of the kraft causticizing reaction. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Ottawa, v. 72, p. 314-320, 1994.

WEHR, T.R.; BARRICHELO, L.E.G. Cozimento kraft com madeiras de *Eucalyptus grandis* de diferentes densidades básicas e dimensões de cavacos. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 25., São Paulo, 1992. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1992. p. 161-177.

GLOSSÁRIO

Álcali Ativo: somatória das cargas de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S);

Álcali Efetivo: somatória das cargas de hidróxido de sódio (NaOH) e ½ sulfeto de sódio (Na₂S);

Alvura: propriedade ótica da polpa celulósica, calculada com base na refletância de radiação nos comprimentos de onda próximos a 457 nm;

Branqueabilidade: propriedade da polpa celulósica que expressa a quantidade de químicos necessária para seu branqueamento até determinado grau de alvura em função do número kappa inicial;

Bulk: volume específico da folha de celulose/papel;

Capilaridade: propriedade da polpa celulósica que representa a penetração de água por seus capilares. Normalmente é dada pela distância entre a superfície da água e o ponto até onde esta subiu no corpo de prova em determinado período de tempo;

Coarseness: massa de fibras por unidade de comprimento;

Densidade aparente dos cavacos: representa a massa de cavacos por unidade de volume em teor de umidade fixo;

Densidade básica da madeira: relação de massa seca por volume saturado de madeira;

Drenabilidade: representa a facilidade da polpa em escoar água;

Fator H: variável única que expressa tempo e temperatura em processos de polpação;

Finos: fração de cavacos descartados na etapa de peneiramento de cavacos por apresentarem espessura inferior à espessura mínima desejada no processo de polpação. Normalmente, estes cavacos são queimados na caldeira de biomassa;

Incremento Médio Anual – IMA: produção volumétrica média anual de madeira em determinada área florestal;

Incremento Médio Anual com casca – IMA c/c: produção volumétrica média anual de madeira e casca em determinada área florestal;

Incremento Médio Anual sem casca – IMA s/c: produção volumétrica média anual de madeira, sem casca, em determinada área florestal;

Incremento Médio Anual de Celulose – IMACEL: equivale à produção média anual de celulose em determinada área florestal;

Incremento Médio Anual Mássico – IMA_{mássico}: produção mássica média anual de madeira em determinada área florestal;

Índice de Retenção de Água: representa a capacidade da polpa celulósica em reter água em sua estrutura;

Licor negro concentrado: licor negro concentrado na área de evaporação e enviado para a caldeira de recuperação. Apresenta de 65 a 85% de sólidos;

Licor negro fraco: licor negro proveniente do cozimento e enviado para a evaporação, com baixo teor de sólidos (normalmente em torno de 15%);

Licor verde: formado pelo smelt, proveniente da queima do licor concentrado na caldeira de recuperação, e água (ou licor branco fraco). Dará origem ao licor branco de cozimento na caustificação;

Número kappa: volume (em mililitros) de solução de permanganato de potássio 0,1 N consumida por um grama de polpa absolutamente seca em condições normatizadas.

Opacidade: medida de absorção da luz pela folha de celulose/papel. Quando a luz incide na folha, parte é refletida, parte absorvida e parte transmitida através da folha. A falta de opacidade reduz o contraste do material impresso;

Overs: fração de cavacos descartados na etapa de peneiramento de cavacos por apresentarem espessura superior à espessura máxima desejada no processo de polpação. Estes cavacos podem ser repicados ou queimados na caldeira de biomassa;

Perfil alcalino: expressão que se refere à variação de concentração do licor ao longo do processo de polpação;

População fibrosa: indica o número de fibras em determinada massa de polpa;

Processo modificado de polpação: processo de polpação que visa melhor distribuição de energia e carga alcalina, buscando aumentar o rendimento, a intensidade de deslignificação e reduzir os impactos ambientais;

Rendimento Bruto: indica o rendimento total do processo de polpação, ou seja, polpa e rejeitos;

Rendimento Depurado: indica o rendimento do processo de polpação sem rejeitos;

Resistência à passagem de ar: representa a resistência da folha de celulose/papel à passagem de ar por sua estrutura;

Resistência à tração: representa a força máxima, por unidade de largura, que uma tira de celulose/papel suporta, sob condições específicas antes de se romper;

Resistência ao estouro: representa a resistência da folha de celulose/papel ao arrebentamento com a aplicação uma pressão uniformemente crescente, transmitida por um diafragma elástico com área circular;

Resistência ao rasgo: representa a força média requerida para continuar o rasgo, a partir de um corte inicial, em uma única folha de celulose/papel;

Rugosidade: indica a existência de irregularidades na consolidação da superfície da folha de celulose/papel;

Sulfidez: relação de carga de sulfeto de sódio (Na_2S) por álcali ativo ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$).

Teor de Rejeitos: indica a parte da madeira que não foi cozida suficientemente no processo de polpação, sendo descartada como rejeito. É composto principalmente de palitos e nós.

APÊNDICES

Apêndice A - Caracterização meteorológica dos locais de coleta

Selvíria – MS

Material coletado: *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (URG);

Classificação do solo: Latossolo vermelho.

Clima de Selvíria – MS (dados históricos, adaptado de CLIMATE-DATA, 2014):

Clima: Tropical (Aw);

Altitude: 357 m;

Temperatura média anual: 23,7°C;

Pluviosidade anual: 1352 mm.

Figura 43 – Temperatura e pluviosidade média mensal de Selvíria – MS

Guarantã – SP**Material coletado:** *Corymbia citriodora* (CIT 01)**Classificação do solo:** Argissolo vermelho-amarelo.**Clima de Guarantã – SP** (dados históricos, adaptado de CLIMATE-DATA, 2014):**Clima:** Temperado (Cfa);**Altitude:** 505 m;**Temperatura média anual:** 21,1°C;**Pluviosidade anual:** 1202 mm.

Figura 44 – Temperatura e pluviosidade média mensal de Guarantã – SP

Água Clara – MS

Material coletado: *Corymbia citriodora* (CIT 02)

Classificação do solo: Neossolo quartzarênico.

Clima de Água Clara – MS (dados históricos, adaptado de CLIMATE-DATA, 2014):

Clima: Tropical (Aw);

Altitude: 303 m;

Temperatura média anual: 24,5°C;

Pluviosidade anual: 1370 mm.

Figura 45 – Temperatura e pluviosidade média mensal de Água Clara – MS

Periquito – MG

Material coletado: *Corymbia torelliana* (TOR)

Classificação do solo: Latossolo vermelho;

Clima de Periquito – MG (dados históricos, adaptado de CLIMATE-DATA, 2014):

Clima: Tropical (Aw);

Altitude: 231 m;

Temperatura média anual: 24°C;

Pluviosidade anual: 1144 mm.

Figura 46 – Temperatura e pluviosidade média mensal de Periquito – MG

Itamarandiba – MG

Materiais coletados: *Corymbia torelliana* x *Corymbia citriodora* (T x C 01)

Corymbia torelliana x *Corymbia citriodora* (T x C 02)

Corymbia citriodora x *Corymbia torelliana* (C x T 01)

Corymbia citriodora x *Corymbia torelliana* (C x T 02)

Classificação do solo: Argissolo vermelho-amarelo.

Clima de Itamarandiba – MG (dados históricos, adaptado de CLIMATE-DATA, 2014):

Clima: Temperado (Cwa);

Altitude: 910 m;

Temperatura média anual: 20,9°C;

Pluviosidade anual: 1112 mm.

Figura 47 – Temperatura e pluviosidade média mensal de Itamarandiba – MG

Apêndice B - Determinação da composição química da madeira

Extrativos Totais

1. Pesar o equivalente a 1g absolutamente seco (a.s.) de serragem e transferir para saquinho de papel filtro;
2. Colocar a amostra no corpo do extrator;
3. Fazer a extração com álcool:tolueno (1:2) e álcool 96° GL, durante 8 horas em cada solvente, deixando secar ao ar após cada extração;
4. Ligar o banho-maria e mantê-lo em ebulição;
5. Transferir toda a serragem do saquinho para erlenmeyer de 250mL;
6. Adicionar 100mL de água destilada e colocar o erlenmeyer no banho-maria (que já deverá estar fervendo) e cobri-lo;
7. Agitar suavemente a cada 15 minutos;
8. Após três horas filtrar através de cadinho de vidro sinterizado tarado, transferindo toda a serragem do erlenmeyer para o cadinho;
9. Lavar o cadinho com 250mL de água quente;
10. Levar o cadinho à estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até massa constante;
11. Pesar o cadinho seco;
12. Calcular o teor de “Extrativos Totais” através da equação 36.

$$ET(\%) = (1 - ms \text{ serragem}) \cdot 100 \quad (36)$$

Em que:

ET(%): Extrativos totais, em %;

ms serragem: massa de serragem seca já descontando a tara do cadinho, em g.

Lignina

13. Pesar 300mg da serragem livre de extrativos seca e transferir para erlenmeyer de 250mL;
14. Adicionar 3mL de H_2SO_4 72% resfriado a $10 - 12^\circ\text{C}$;
15. Manter em banho-maria a $30 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 1 hora, misturando frequentemente com auxílio de bastonete;
16. Retirar do banho-maria e adicionar 84mL de água destilada quente, transformando o H_2SO_4 72% em H_2SO_4 3%;

17. Colocar o erlenmeyer em autoclave, devidamente vedado com papel alumínio, a 118°C (27psi) durante 60 minutos;
18. Filtrar através de cadinho sinterizado tarado, fazendo um fundo com papel de filtro, e transferir toda a lignina do erlenmeyer para o cadinho;
19. Lavar com 700mL de água quente;
20. Levar o cadinho à estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até massa constante;
21. Pesar o cadinho seco;
22. Calcular o teor de lignina Klason através da equação 37.

$$LK(\%) = \left(\frac{\frac{MS}{0,3}}{1 - \frac{ET(\%)}{100}} \right) \cdot 100 \quad (37)$$

Em que:

LK(%): lignina Klason (insolúvel), em %;

MS: massa de lignina seca já descontando a tara do cadinho, em g;

ET(%): teor de extrativos totais, em %.

23. Transferir o filtrado obtido nos itens 18 e 19 para balão volumétrico de 1000 mL, completando o volume com água destilada;
24. Preparar prova em branco, diluindo 3mL de ácido sulfúrico 72% para 1000 mL;
25. Utilizando cubeta de quartzo e a prova em branco, ajustar o espectrofotômetro em 0 de absorbância nos comprimentos de onda 215nm e 280nm;
26. Prosseguir com a leitura dos filtrados;
27. Calcular os teores de lignina solúvel, lignina total e holocelulose através das equações 38 a 40.

$$LS(\%) = \left(\frac{\frac{4,53 \cdot L_{215} - L_{280}}{300 \cdot \frac{0,3}{1 - \frac{ET(\%)}{100}}}}{1 - \frac{ET(\%)}{100}} \right) \cdot 100 \quad (38)$$

$$LT(\%) = LK(\%) + LS(\%) \quad (39)$$

$$Holo(\%) = 100 - (ET(\%) + LT(\%)) \quad (40)$$

Em que:

LS(%): teor de lignina solúvel, em %;

L215: leitura de absorvância no comprimento de onda de 215nm;

L280: leitura de absorvância no comprimento de onda de 280nm;

ET(%): teor de extrativos totais, em %;

LT(%): teor de lignina total, em %;

LK(%): teor de lignina Klason, em %;

Holo(%): teor de holocelulose, em %.

Apêndice C - Determinação do álcali ativo em licores brancos e licores negros

1. Adicionar, em um erlenmeyer, 50 mL de água destilada, 5 mL do licor (licor branco ou licor negro) e 25 mL de Cloreto de Bário 10%;
2. Titular com ácido clorídrico 0,5 N até pH 9,34 (VOL.A);
3. Adicionar 5 mL de formaldeído 37%;
4. Titular com ácido clorídrico 0,5 N até pH 9,34 (VOL.B);
5. Calcular as concentrações de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S) através das fórmulas:

$$\text{NaOH (g/L)} = (2 \times \text{VOL. A} - \text{VOL. B}) \times 8 \times \text{N HCl}$$

$$\text{Na}_2\text{S (g/L)} = 2 \times (\text{VOL. B} - \text{VOL. A}) \times 8 \times \text{N HCl}$$

Em que:

N HCL: Normalidade do ácido clorídrico.

6. Calcular álcali ativo, álcali efetivo e sulfidez através das fórmulas:

$$\text{Álcali Ativo (g/L)} = \text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$$

$$\text{Álcali Efetivo (g/L)} = \text{NaOH} + \frac{1}{2} \text{Na}_2\text{S}$$

$$\text{Sulfidez (\%)} = \frac{\text{Na}_2\text{S}}{\text{Álcali Ativo}}$$

Apêndice D - Análises de variância

Tabela 53 – Análise de variância para densidade básica de discos - URG

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,00905	0,00226	6,1784**
Resíduo	45	0,01647	0,00037	
Total	49	0,02552		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)

d.m.s. = 0,02432

Tabela 54 – Análise de variância para densidade básica de discos – CIT 01

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,03978	0,00994	4,9127*
Resíduo	45	0,09109	0,00202	
Total	49	0,1387		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)

d.m.s. = 0,05720

Tabela 55 – Análise de variância para densidade básica de discos – CIT 02

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,03211	0,00803	6,8548**
Resíduo	45	0,05271	0,00117	
Total	49	0,08482		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)

d.m.s. = 0,04351

Tabela 56 – Análise de variância para densidade básica de discos – TOR

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,04913	0,1228	12,5309**
Resíduo	45	0,04411	0,00098	
Total	49	0,09323		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)

d.m.s. = 0,03980

Tabela 57 – Análise de variância para densidade básica de discos – T x C 01

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,05492	0,01373	71,6241**
Resíduo	45	0,00864	0,00019	
Total	49	0,06356		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 0,01761

Tabela 58 – Análise de variância para densidade básica de discos – T x C 02

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,03125	0,00781	36,8212**
Resíduo	45	0,00955	0,00021	
Total	49	0,04079		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 0,01852

Tabela 59 – Análise de variância para densidade básica de discos – C x T 01

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,01421	0,00355	5,1931**
Resíduo	45	0,03078	0,00068	
Total	49	0,04500		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 0,03325

Tabela 60 – Análise de variância para densidade básica de discos – C x T 02

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,00523	0,00131	4,6025**
Resíduo	45	0,01277	0,00028	
Total	49	0,01800		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 0,02142

Tabela 61 – Análise de variância para densidade básica da casca - URG

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,02639	0,00660	24,6300**
Resíduo	45	0,01206	0,00027	
Total	49	0,03845		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 0,02081

Tabela 62 – Análise de variância para densidade básica da casca – CIT 01

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,00120	0,00030	0,7503 ^{ns}
Resíduo	45	0,01795	0,00040	
Total	49	0,01915		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 0,02539

Tabela 63 – Análise de variância para densidade básica da casca – CIT 02

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,00611	0,00153	0,9992 ^{ns}
Resíduo	45	0,06881	0,00153	
Total	49	0,07492		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 0,04971

Tabela 64 – Análise de variância para densidade básica da casca – TOR

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,02815	0,00704	5,6777**
Resíduo	45	0,05578	0,00124	
Total	49	0,08393		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 0,04476

Tabela 65 – Análise de variância para densidade básica da casca – T x C 01

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,00741	0,00185	15,6183**
Resíduo	45	0,00534	0,00012	
Total	49	0,01275		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 0,01385

Tabela 66 – Análise de variância para densidade básica da casca – T x C 02

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,01260	0,00315	10,2851**
Resíduo	45	0,01378	0,00031	
Total	49	0,02638		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 0,02225

Tabela 67 – Análise de variância para densidade básica da casca – C x T 01

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,01130	0,00283	6,0393**
Resíduo	45	0,02105	0,00047	
Total	49	0,03235		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 0,02750

Tabela 68 – Análise de variância para densidade básica da casca – C x T 02

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,00213	0,00053	3,3111*
Resíduo	45	0,00725	0,00016	
Total	49	0,00938		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 0,01613

Tabela 69 – Análise de variância para densidade básica ponderada da madeira

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	0,37289	0,05327	97,3421**
Resíduo	12	0,03940	0,00055	
Total	79	0,41229		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)

d.m.s. = 0,03265

Tabela 70 – Análise de variância para densidade básica ponderada da casca

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	0,08465	0,01209	43,1490**
Resíduo	12	0,02018	0,00028	
Total	79	0,10482		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)

d.m.s. = 0,33400

Tabela 71 – Análise de variância para densidade básica total (madeira + casca)

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	0,25771	0,03682	70,6126**
Resíduo	12	0,03754	0,00052	
Total	79	0,29525		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)

d.m.s. = 0,03187

Tabela 72 – Análise de variância para teor de casca em volume

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	2479,75888	354,25127	40,6436**
Resíduo	12	627,55500	8,71604	
Total	79	3107,31387		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)

d.m.s. = 4,12028

Tabela 73 – Análise de variância para teor de casca em massa

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	1269,18888	181,31270	42,0255**
Resíduo	12	310,63300	4,31435	
Total	79	1579,82188		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)

d.m.s. = 2,89884

Tabela 74 – Análise de variância para densidade básica dos cavacos

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	0,19569	0,02796	303,1028**
Resíduo	72	0,00664	0,00009	
Total	79	0,20233		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)

d.m.s. = 0,01340

Tabela 75 – Análise de variância para densidade aparente dos cavacos

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	0,02376	0,00339	99,0482**
Resíduo	72	0,00247	0,00003	
Total	79	0,02623		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)

d.m.s. = 0,00875

Tabela 76 – Análise de variância para teor de extrativos totais

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	310,61584	44,37369	172,1462**
Resíduo	32	8,24856	0,25777	
Total	39	318,86440		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)

d.m.s. = 1,03991

Tabela 77 – Análise de variância para lignina total

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	158,49574	22,64225	6,4995**
Resíduo	32	111,47860	3,48371	
Total	39	269,97434		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 3,82297

Tabela 78 – Análise de variância para cinzas

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	0,63980	0,09140	101,0869**
Resíduo	16	0,01447	0,00090	
Total	23	0,65426		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 0,08507

Tabela 79 – Análise de variância para comprimento das fibras

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	0,78753	0,11250	12,3126**
Resíduo	792	7,23671	0,00914	
Total	799	8,02423		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 0,04103

Tabela 80 – Análise de variância para largura das fibras

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	1382,54700	197,50671	66,4247**
Resíduo	792	2354,92795	2,97339	
Total	799	3737,47495		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 0,74018

Tabela 81 – Análise de variância para diâmetro do lume

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	4925,12000	703,58857	230,9119**
Resíduo	792	2413,22444	3,04700	
Total	799	7338,34444		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 0,74929

Tabela 82 – Análise de variância para espessura de parede

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	334,91243	47,84463	169,9759**
Resíduo	792	222,93129	0,28148	
Total	799	557,84372		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 0,22774

Tabela 83 – Análise de variância para rendimento depurado

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	146,95833	20,99405	29,9915**
Resíduo	16	11,20000	0,70000	
Total	23	158,15833		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 2,36693

Tabela 84 – Análise de variância para ácidos hexenurônicos na polpa marrom

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	1009,58664	144,22666	3,7471*
Resíduo	16	615,84321	38,49020	
Total	23	1625,42985		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. =

Tabela 85 – Análise de variância para alvura da polpa marrom

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	326,13292	46,59042	28,1868**
Resíduo	16	26,44667	1,65292	
Total	23	352,57958		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)

d.m.s. = 3,63715

Tabela 86 – Análise de variância para viscosidade da polpa marrom

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	112343,83333	16049,11905	11,5983**
Resíduo	16	22140,00000	1383,75000	
Total	23	134483,83333		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)

d.m.s. = 105,23600

Tabela 87 – Análise de variância para sólidos gerados

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	0,45856	0,06551	55,3597**
Resíduo	16	0,01893	0,00118	
Total	23	0,47750		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)

d.m.s. = 0,09732

Tabela 88 – Análise de variância para número kappa após deslignificação com oxigênio

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	25,43866	3,63409	14,3152**
Resíduo	16	4,06180	0,25386	
Total	23	29,50046		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)

d.m.s. = 1,42539

Tabela 89 – Análise de variância para ácidos hexenurônicos após deslignificação

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	995,26904	142,18129	14,3022**
Resíduo	16	159,05953	9,94122	
Total	23	1154,32857		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 8,91980

Tabela 90 – Análise de variância para alvura após deslignificação

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	149,27167	21,32452	4,5618**
Resíduo	16	74,79333	4,67458	
Total	23	224,06500		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 6,11656

Tabela 91 – Análise de variância para viscosidade após deslignificação

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	137982,29167	19711,75595	6,1321**
Resíduo	16	51432,66667	3214,54167	
Total	23	189414,95833		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 160,39650

Tabela 92 – Análise de variância para viscosidade das polpas branqueadas

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	117188,66667	16741,23810	13,9085**
Resíduo	16	19258,66667	1203,66667	
Total	23	136447,33333		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)
d.m.s. = 98,14961

Tabela 93 – Análise de variância para reversão de alvura das polpas branqueadas

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	1,86667	0,26667	0,8322 ^{ns}
Resíduo	16	5,12667	0,32041	
Total	23	6,99333		

Em que: ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$)

d.m.s. = 1,60138

Apêndice E - Perfil de temperatura e fator H ao longo dos cozimentos

Figura 48 – Perfil de temperatura e fator H – *E. grandis* x *E. urophylla* (URG)

Figura 49 – Perfil de temperatura e fator H – *C. citriodora* (CIT 01)

Figura 50 – Perfil de temperatura e fator H – *C. citriodora* (CIT 02)

Figura 51 – Perfil de temperatura e fator H – *C. torelliana* (TOR)

Figura 52 – Perfil de temperatura e fator H – *C. torelliana* x *C. citriodora* – (T x C 01)

Figura 53 – Perfil de temperatura e fator H – *C. torelliana* x *C. citriodora* (T x C 02)

Figura 54 – Perfil de temperatura e fator H – *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01)

Figura 55 – Perfil de temperatura e fator H – *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02)

Apêndice F - Caracterização dos licores de cozimento

Tabela 94 – Caracterização dos licores de cozimento – *E. grandis* x *E. urophylla* (URG)

Tempo (min.)	Tempo (%)	Temp. (°C)	Fator H	Sólidos Totais	Sólidos Inorgânicos	Sólidos Orgânicos	AA	pH
				(%)				
0	0,0	64,0	0	4,3	0,7	3,7	10,0	12,6
30	11,3	120,1	2	6,2	3,2	3,0	3,3	12,7
30'	11,3	120,1	2	6,7	4,1	2,6	7,5	12,8
60	22,6	154,9	78	9,1	4,1	5,1	5,3	12,8
90	34,0	155,0	211	11,4	4,2	7,3	4,0	12,3
120	45,3	155,5	345	12,5	4,1	8,4	3,5	12,1
140	52,8	155,5	435	12,6	4,0	8,6	3,3	12,1
140'	52,8	155,5	435	9,5	3,8	5,7	5,9	12,7
170	64,2	155,0	571	10,2	3,9	6,4	5,9	12,4
200	75,5	155,3	707	11,0	3,8	7,1	5,5	12,3
230	86,8	155,3	845	11,4	3,8	7,6	5,3	12,0
260	98,1	155,5	984	11,7	4,0	7,7	4,9	12,2
265	100,0	155,0	1007	11,8	3,9	7,9	5,1	12,2

30' – dados dos licores após a injeção aos 30 minutos

140' – dados dos licores após a injeção aos 140 minutos

Tabela 95 – Caracterização dos licores de cozimento – *C. citriodora* (CIT 01)

Tempo (min.)	Tempo (%)	Temp. (°C)	Fator H	Sólidos Totais	Sólidos Inorgânicos	Sólidos Orgânicos	AA	pH
				(%)				
0	0,0	62,3	0	4,1	0,8	3,3	9,5	12,6
30	11,3	121,0	3	5,6	3,0	2,6	3,6	11,8
30'	11,3	121,0	3	6,3	4,2	2,1	8,0	12,1
60	22,6	153,5	68	8,5	3,8	4,7	5,3	11,8
90	34,0	153,6	187	9,8	3,6	6,2	3,9	11,9
120	45,3	153,5	305	11,7	3,8	7,9	3,5	10,7
140	52,8	154,0	383	12,1	3,8	8,3	3,2	10,7
140'	52,8	154,0	383	9,1	3,7	5,5	5,8	11,7
170	64,2	152,9	501	9,9	3,7	6,2	5,6	11,6
200	75,5	153,0	617	10,5	3,8	6,7	5,4	11,6
230	86,8	154,0	733	10,2	3,1	7,0	5,3	11,5
260	98,1	154,0	853	10,8	3,9	6,9	5,2	11,4
265	100,0	154,0	874	10,9	4,2	6,7	5,0	11,3

30' – dados dos licores após a injeção aos 30 minutos

140' – dados dos licores após a injeção aos 140 minutos

Tabela 96 – Caracterização dos licores de cozimento – *C. citriodora* (CIT 02)

Tempo (min.)	Tempo (%)	Temp. (°C)	Fator H	Sólidos Totais	Sólidos Inorgânicos (%)	Sólidos Orgânicos	AA	pH
0	0,0	63,0	0	4,8	0,7	4,0	11,0	12,7
30	11,3	121,1	3	6,2	3,0	3,3	4,1	12,0
30'	11,3	121,1	3	7,3	4,6	2,7	6,3	12,1
60	22,6	157,9	97	9,0	4,4	4,6	6,8	12,1
90	34,0	157,8	272	10,8	4,2	6,6	4,1	11,8
120	45,3	158,3	444	13,4	3,8	9,6	3,5	11,3
140	52,8	157,8	562	13,3	4,3	9,0	2,9	10,7
140'	52,8	157,8	562	11,0	3,9	7,1	5,7	11,9
170	64,2	158,0	736	10,9	3,8	7,1	5,7	11,6
200	75,5	158,4	911	11,0	4,1	7,0	5,2	11,6
230	86,8	158,3	1085	11,5	4,2	7,3	5,0	11,5
260	98,1	158,0	1262	11,8	4,1	7,7	4,8	11,4
265	100,0	158,0	1291	11,8	4,4	7,4	4,7	11,3

30' – dados dos licores após a injeção aos 30 minutos

140' – dados dos licores após a injeção aos 140 minutos

Tabela 97 – Caracterização dos licores de cozimento – *C. torelliana* (TOR)

Tempo (min.)	Tempo (%)	Temp. (°C)	Fator H	Sólidos Totais	Sólidos Inorgânicos (%)	Sólidos Orgânicos	AA	pH
0	0,0	65,0	0	4,1	0,6	3,5	11,3	12,5
30	11,3	120,0	3	6,7	3,5	3,2	4,3	12,1
30'	11,3	120,0	3	7,1	4,3	2,8	8,8	11,9
60	22,6	159,8	109	9,8	4,2	5,7	5,8	11,9
90	34,0	160,2	312	12,3	4,2	8,1	4,2	11,7
120	45,3	160,0	518	13,4	4,2	9,2	3,6	11,3
140	52,8	160,3	656	12,9	4,0	9,0	3,1	11,2
140'	52,8	160,3	656	9,5	3,7	5,8	5,9	11,8
170	64,2	160,3	864	10,1	3,7	6,4	5,9	11,7
200	75,5	160,3	1072	10,7	3,9	6,8	5,6	11,6
230	86,8	160,1	1278	11,2	4,0	7,2	5,4	11,6
260	98,1	160,0	1486	11,4	4,0	7,4	5,2	11,6
265	100,0	160,0	1520	11,5	3,8	7,6	4,9	11,6

30' – dados dos licores após a injeção aos 30 minutos

140' – dados dos licores após a injeção aos 140 minutos

Tabela 98 – Caracterização dos licores de cozimento – *C. torelliana* x *C. citriodora* – (T x C 01)

Tempo (min.)	Tempo (%)	Temp. (°C)	Fator H	Sólidos Totais	Sólidos Inorgânicos	Sólidos Orgânicos	AA	pH
				(%)				
0	0,0	62,0	0	4,4	0,7	3,7	12,5	12,4
30	11,3	119,0	2	7,7	3,4	4,2	3,9	12,2
30'	11,3	119,0	2	7,7	4,4	3,3	8,8	12,7
60	22,6	165,1	159	10,7	4,2	6,5	4,7	12,5
90	34,0	165,3	475	13,1	4,2	8,9	2,9	12,1
120	45,3	165,0	790	14,0	4,1	9,9	2,3	11,3
140	52,8	165,0	997	13,7	4,2	9,5	1,9	11,3
140'	52,8	165,0	997	9,2	3,8	5,4	5,9	12,4
170	64,2	164,8	1308	9,9	3,8	6,2	5,3	12,5
200	75,5	164,8	1621	10,8	3,9	6,9	4,5	12,3
230	86,8	164,8	1935	11,8	3,9	7,9	4,6	12,4
260	98,1	165,0	2246	11,3	4,0	7,4	4,3	12,3
265	100,0	165,0	2299	11,4	3,9	7,5	4,0	12,2

30' – dados dos licores após a injeção aos 30 minutos

140' – dados dos licores após a injeção aos 140 minutos

Tabela 99 – Caracterização dos licores de cozimento – *C. torelliana* x *C. citriodora* – (T x C 02)

Tempo (min.)	Tempo (%)	Temp. (°C)	Fator H	Sólidos Totais	Sólidos Inorgânicos	Sólidos Orgânicos	AA	pH
				(%)				
0	0,0	64,0	0	4,1	0,7	3,5	11,8	12,5
30	11,3	119,0	2	7,5	3,6	3,8	3,8	11,8
30'	11,3	119,0	2	7,4	4,1	3,3	8,6	12,0
60	22,6	160,1	109	10,0	4,3	5,7	5,3	11,8
90	34,0	160,1	317	12,5	4,4	8,1	3,3	11,4
120	45,3	160,1	524	13,4	4,2	9,2	3,0	11,3
140	52,8	160,0	664	13,2	4,1	9,1	2,8	11,1
140'	52,8	160,0	664	9,4	3,4	6,0	5,8	11,8
170	64,2	159,6	866	9,8	3,7	6,1	5,5	11,7
200	75,5	159,7	1069	10,6	3,8	6,8	5,3	11,7
230	86,8	159,7	1271	11,4	4,0	7,4	4,9	11,6
260	98,1	159,7	1473	11,4	4,0	7,3	4,7	11,5
265	100,0	160,0	1506	11,4	4,1	7,3	4,8	11,5

30' – dados dos licores após a injeção aos 30 minutos

140' – dados dos licores após a injeção aos 140 minutos

Tabela 100 – Caracterização dos licores de cozimento – *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 01)

Tempo (min.)	Tempo (%)	Temp. (°C)	Fator H	Sólidos Totais	Sólidos Inorgânicos (%)	Sólidos Orgânicos	AA	pH
0	0,0	62,0	0	4,0	0,5	3,5	11,0	12,6
30	11,3	120,0	3	7,3	3,5	3,8	3,0	11,9
30'	11,3	120,0	3	7,6	4,5	3,1	7,8	12,0
60	22,6	156,7	88	10,2	4,4	5,9	4,7	11,7
90	34,0	157,2	245	12,1	4,3	7,8	3,6	11,6
120	45,3	157,0	402	13,1	4,3	8,8	3,1	11,1
140	52,8	157,2	507	13,0	4,1	8,8	2,7	10,8
140'	52,8	157,2	507	9,5	3,9	5,7	5,4	11,9
170	64,2	157,0	665	10,4	4,0	6,4	5,3	11,8
200	75,5	156,9	823	11,0	4,0	7,0	5,2	11,8
230	86,8	157,2	980	11,3	4,1	7,2	5,0	11,6
260	98,1	157,2	1138	11,5	4,2	7,3	4,7	11,6
265	100,0	157,0	1164	11,5	4,1	7,4	4,1	11,1

30' – dados dos licores após a injeção aos 30 minutos

140' – dados dos licores após a injeção aos 140 minutos

Tabela 101 – Caracterização dos licores de cozimento – *C. citriodora* x *C. torelliana* (C x T 02)

Tempo (min.)	Tempo (%)	Temp. (°C)	Fator H	Sólidos Totais	Sólidos Inorgânicos (%)	Sólidos Orgânicos	AA	pH
0	0,0	63,0	0	4,0	0,5	3,5	11,0	12,6
30	11,3	120,0	2	6,9	3,2	3,7	3,2	11,8
30'	11,3	120,0	2	7,1	4,0	3,1	7,7	12,0
60	22,6	158,3	98	9,6	3,9	5,7	4,7	11,8
90	34,0	158,4	276	11,9	4,1	7,8	3,2	11,1
120	45,3	157,8	449	12,6	4,2	8,5	2,6	10,7
140	52,8	158,2	563	12,2	4,1	8,2	2,2	10,4
140'	52,8	158,2	563	8,9	3,6	5,3	5,2	11,8
170	64,2	158,0	738	9,8	3,7	6,1	4,9	11,7
200	75,5	158,4	913	10,7	3,7	7,0	4,4	11,5
230	86,8	157,9	1087	11,0	3,8	7,3	4,3	11,6
260	98,1	157,8	1258	11,1	4,0	7,1	4,0	11,5
265	100,0	158,0	1287	11,1	3,9	7,2	3,7	11,5

30' – dados dos licores após a injeção aos 30 minutos

140' – dados dos licores após a injeção aos 140 minutos

Apêndice G - Caracterização dos licores de cozimento

Figura 56 – Perfil de álcali ativo e sulfidez ao longo dos cozimentos. A: URG; B: CIT 01; C: CIT 02; D: TOR

Figura 57 – Perfil de álcali ativo e sulfidez ao longo dos cozimentos. A: T x C 01; B: T x C 02; C: C x T 01; D: C x T 02

Apêndice H - Regressão dos dados dos testes físicos-mecânicos

Tabela 102 – Ajuste de modelo matemático para variação correlação entre índice de tração e número de revoluções. Modelo ajustado: $y = (a + b \cdot \ln x)^2$, em que x: índice de tração ($\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$); y: número de revoluções

Material genético	a	b	R ²
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	-138,86	42,3964	0,9952
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	-114,17	38,2269	0,976
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	-124,59	41,6703	0,9957
<i>C. torelliana</i> - TOR	-227,10	64,252	0,9838
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	-177,33	52,52	0,9862
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	-131,08	42,3158	0,9754
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	-198,57	55,7268	0,9841
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	-455,89	119,146	0,846

Tabela 103 – Ajuste de modelo matemático para variação correlação entre índice de tração e drenabilidade. Modelo ajustado: $y = \frac{1}{a + b \cdot \sqrt{x}}$, em que x: índice de tração ($\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$); y: drenabilidade (°SR)

Material genético	a	b	R ²
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	0,1027	-0,008408	0,9911
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	0,1054	-0,009311	0,9996
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	0,1134	-0,011099	0,9922
<i>C. torelliana</i> - TOR	0,1322	-0,013017	0,9842
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	0,1156	-0,011238	0,9986
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	0,1082	-0,010382	0,9886
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	0,1053	-0,009316	0,9890
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	0,2374	-0,025844	0,856

Tabela 104 – Ajuste de modelo matemático para variação correlação entre índice de tração e volume específico. Modelo ajustado: $y = \sqrt{a + b \cdot \sqrt{x}}$, em que x: índice de tração ($\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$); y: volume específico ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)

Material genético	a	b	R ²
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	5,3498	-0,404414	0,9885
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	6,4410	-0,461235	0,984
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	5,8817	-0,423065	0,9923
<i>C. torelliana</i> - TOR	6,1955	-0,501881	0,9794
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	6,9559	-0,581037	0,9385
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	5,7356	-0,464862	0,9739
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	5,0268	-0,374793	0,9109
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	8,3736	-0,808753	0,8858

Tabela 105 – Ajuste de modelo matemático para variação correlação entre índice de tração e resistência à passagem do ar. Modelo ajustado: $y = \exp(a + b \cdot x^2)$, em que x: índice de tração ($\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$); y: resistência à passagem do ar ($\text{s} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$)

Material genético	a	b	R ²
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	-0,82119	0,0005125	0,9954
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	-0,78775	0,0003907	0,9617
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	-1,03495	0,0006128	0,8773
<i>C. torelliana</i> - TOR	-1,8145	0,0007930	0,8321
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	-0,47626	0,0006337	0,9629
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	-1,16342	0,0008076	0,9072
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	-0,40857	0,0006415	0,9710
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	-1,73792	0,0012633	0,8262

Tabela 106 – Ajuste de modelo matemático para variação correlação entre índice de tração e opacidade. Modelo ajustado: $y = a + b \cdot x$, em que x: índice de tração ($\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$); y: opacidade (%)

Material genético	a	b	R ²
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	82,0106	-0,127694	0,9393
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	77,1496	-0,064411	0,9747
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	76,6431	-0,056865	0,9899
<i>C. torelliana</i> - TOR	80,8672	-0,141538	0,9458
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	78,7276	-0,099506	0,9981
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	78,5146	-0,118206	0,9747
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	82,4652	-0,141317	0,9293
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	86,4975	-0,236701	0,7703

Tabela 107 – Ajuste de modelo matemático para variação correlação entre índice de tração e capilaridade Klemm. Modelo ajustado: $y = a + b \cdot x$, em que x: índice de tração ($\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$); y: capilaridade Klemm ($\text{mm} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$)

Material genético	a	b	R ²
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	124,055	-1,05796	0,9966
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	181,174	-1,61398	0,9906
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	194,462	-2,1428	0,9983
<i>C. torelliana</i> - TOR	191,171	-1,86871	0,9008
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	176,187	-1,88905	0,9891
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	158,858	-1,73822	0,9957
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	130,137	-1,22249	0,9955
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	194,962	-2,34175	0,6961

Tabela 108 – Ajuste de modelo matemático para variação correlação entre índice de tração e índice de retenção de água. Modelo ajustado: $y = a + b \cdot x$, em que x: índice de tração ($\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$); y: índice de retenção de água (%)

Material genético	a	b	R ²
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	183,153	1,17067	0,9965
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	130,658	1,54035	0,9709
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	128,094	1,74026	0,9784
<i>C. torelliana</i> - TOR	113,375	2,08151	0,9166
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	131,649	1,8011	0,9717
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	162,031	1,56636	0,9825
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	165,507	1,35628	0,9865
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	57,1329	2,95811	0,8418

Tabela 109 – Ajuste de modelo matemático para variação correlação entre índice de tração e índice de estouro. Modelo ajustado: $y = \sqrt{a + b \cdot x^2}$, em que x: índice de tração ($\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$); y: índice de estouro ($\text{kPam}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)

Material genético	a	b	R ²
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	-2,26503	0,005996	0,9972
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	-0,137211	0,004127	0,996
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	-1,63555	0,005190	0,9923
<i>C. torelliana</i> - TOR	-3,32523	0,006398	0,9939
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	-2,70636	0,004734	0,9968
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	-1,78244	0,006110	0,999
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	-5,05367	0,005940	0,9715
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	-10,7734	0,008413	0,9863

Tabela 110 – Ajuste de modelo matemático para variação correlação entre índice de tração e índice de rasgo. Modelo ajustado: $y = \left(a + \frac{b}{x}\right)^2$, em que x: índice de tração ($\text{Nm} \cdot \text{g}^{-1}$); y: índice de rasgo ($\text{mNm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)

Material genético	a	b	R ²
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> - URG	3,21203	-24,663	0,988
<i>C. citriodora</i> - CIT 01	3,28494	-28,5253	0,9838
<i>C. citriodora</i> - CIT 02	3,15281	-24,8682	0,9949
<i>C. torelliana</i> - TOR	2,61183	4,11096	0,9782
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 01	2,36115	-12,3225	0,7354
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> - T x C 02	3,30505	-27,0891	0,9884
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 01	2,58575	-15,3933	0,6113
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> - C x T 02	1,80924	24,5755	0,9128