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

**Impacto da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* na eficiência
dos processos de polpação kraft estendidos**

Marina Ulian Coelho

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

**Piracicaba
2021**

Marina Ulian Coelho
Engenheira Florestal

**Impacto da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* na eficiência dos processos
de polpação kraft estendidos**

Versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

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

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

Piracicaba
2021

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

Coelho, Marina Ulian

Impacto da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* na eficiência dos processos de polpação kraft estendidos / Marina Ulian Coelho - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGR 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2021.

135 p.

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

1. Eucalipto 2. Polpa celulósica 3. Processo estendido de polpação 4. Consumo específico de madeira I. Título

A meus avós, *Yara e José*, pelo exemplo;
A meus pais, *Suzana e Luiz*, pelo apoio incondicional;
Ao meu marido, *Lucas*, por todo amor e parceria.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A conquista do título de Doutora não se dá de um dia para o outro, muito menos sozinha. Nesse sentido, existem diversas pessoas que cruzaram o meu caminho durante essa longa jornada que precisam ser mencionadas nessa breve nota de **Agradecimentos**.

Gostaria de iniciar com um agradecimento especial ao meu marido **Lucas**: a sua presença em minha vida me impulsiona a ser melhor a cada dia. Não há palavras que consigam descrever a minha gratidão a toda minha **família**, que mesmo longe fisicamente, se fez presente e me incentivou em todos os momentos dessa jornada. A distância física do meu núcleo familiar foi compensada pelo privilégio de poder conviver com outra parte da família igualmente especial: agradeço imensamente à querida **Tia Therezinha** e a toda família Ferreira, vocês foram o meu porto seguro em Piracicaba.

Para o sucesso dessa jornada, foi fundamental poder contar com a generosa orientação do **Professor Francides Gomes da Silva Junior**: agradeço pela confiança, parceria e, principalmente, pelos valiosos ensinamentos durante todos esses anos de trabalho.

Tenho muito orgulho dos proveitosos anos que passei na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (**ESALQ/USP**), local em que vários profissionais referência da área florestal também passaram. Agradeço a todos os professores e funcionários do Departamento de Ciências Florestais (**LCF**) e do Programa de Pós Graduação em Recursos Florestais (**PPGRF**).

Tenho mais orgulho ainda de ter feito parte do grupo de pesquisadores que se especializou no Laboratório de Química, Celulose e Energia (**LQCE**), laboratório referência na formação de profissionais da área de Celulose e Papel no Brasil. Agradeço a meus colegas de laboratório, pela troca de experiências, ensinamentos e amizade, especialmente: Camila Sarto, Eduardo Almeida, Marcela Sbríça, Marina Zanão, Regina Gomes e Ana Batista. Agradeço a Matheus Valério, Cauê Michelim e Isabela Filizola pelo auxílio nas análises laboratoriais realizadas nessa pesquisa. Ao José Martins, pela amizade cultivada ao longo dos anos e pelos ensinamentos que levarei para a vida.

Agradeço ao Professor Mário Tommasiello e a equipe do Laboratório de Anatomia, Identificação e Densitometria de Raios X em madeira, por todo apoio e estrutura para a execução das análises de dimensões das fibras.

As bolsas de estudo concedidas pelas instituições de fomento foram essenciais para poder concluir essa trajetória: agradeço à Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz (**FEALQ**) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (**CAPES**) – Código de Financiamento 001.

Agradeço à **Suzano Papel e Celulose** pelo fornecimento dos materiais que viabilizaram a execução dessa pesquisa. Em especial, agradeço a José Luiz Stape e Aguinaldo José de Sousa, pela oportunidade de conduzir esse projeto, e ao Sr. Áureo Delboni e equipe, pela coleta, preparo e transporte dos materiais utilizados.

E por fim, mas de forma alguma menos importante, agradeço a todos os amigos que cultivei nesses anos de doutorado. Em especial: Gabrielle Alencar, Ana Flávia, Analder Neto, Bruno Balboni, Caio Almeida, Denise Petroni e Alessandra Batista – nossas trocas tornaram essa etapa mais leve e divertida.

A todos que contribuíram para a realização desse trabalho:

OBRIGADA!

*... Mas renova-se a esperança
Nova aurora a cada dia
E há que se cuidar do broto
Pra que a vida nos dê
Flor, flor e fruto
Coração de estudante
Há que se cuidar da vida
Há que se cuidar do mundo
Tomar conta da amizade
Alegria e muito sonho
Espalhados no caminho
Verdes, planta e sentimento
Folhas, coração
Juventude e fé...*

Milton Nascimento

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	10
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS.....	12
1. INTRODUÇÃO	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. O gênero <i>Eucalyptus</i>	19
2.2. Densidade básica.....	21
2.3. Processo de polpação kraft convencional e modificado	28
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3.1. Material.....	37
3.2. Amostragem.....	38
3.3. Métodos.....	42
3.3.1. Densidade básica	42
3.3.2. Espessura dos cavacos	43
3.3.3. Composição química da madeira.....	44
3.3.4. Dimensões das fibras	45
3.3.5. Processos de polpação	46
3.4. ANÁLISE DE DADOS.....	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1. Densidade básica.....	51
4.1.1. Densidade básica dos discos	51
4.1.2. Densidade básica dos cavacos.....	57
4.2. Espessura dos cavacos.....	61
4.3. Composição química da madeira	65
4.4. Dimensões das fibras.....	71
4.5. Processos de polpação.....	77
4.5.1. Análises das polpas celulósicas.....	80
4.5.2. Análises dos licores negros	94
5. Conclusões.....	101
REFERÊNCIAS.....	103
APÊNDICES.....	123

RESUMO

Impacto da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* na eficiência dos processos de polpação kraft estendidos

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a influência da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* nos processos de polpação kraft estendidos. Para a realização do estudo em questão, foram utilizados seis materiais genéticos selecionados de florestas plantadas comerciais, provenientes de três estados brasileiros: *E. urophylla* x *E. grandis* (**U x G**) e *E. urophylla* x *E. tereticornis* (**U x T**) – Maranhão; *E. urophylla* (**Ur**) e *E. grandis* híbrido (**HGr**) – Bahia; *E. grandis* x *E. urophylla* (**G x U**) e *E. grandis* (**Gr**) – São Paulo. Os materiais foram caracterizados tecnologicamente quanto à densidade básica da madeira, composição química e dimensões das fibras. Em seguida, os materiais foram submetidos a dois processos de polpação: convencional (**C**): cozimento referência e estendido (**E**): simulação laboratorial simplificada aos processos modificados de polpação. Ambos os processos visaram obter polpas celulósicas com número kappa $18 \pm 5\%$, com álcali efetivo residual do licor negro entre 5 e 8 gNaOH/L, tendo como variáveis de controle a carga alcalina aplicada e a temperatura máxima de cozimento. A caracterização física das madeiras demonstrou que as mesmas apresentaram densidades básicas dos cavacos estatisticamente distintas, variando entre $0,416 \text{ g/cm}^3$ (Gr) e $0,610 \text{ g/cm}^3$ (U x T). A madeira com menor densidade básica (Gr) apresentou características químicas mais favoráveis aos processos de polpação, se comparada aos demais materiais: maior teor de holocelulose (69,37%), menores teores de extrativos (1,46%) e de cinzas (0,21%). A madeira mais densa (U x T) apresentou propriedades das fibras discrepantes, com maior fração parede (60%) e menor diâmetro de lume ($6,76 \mu\text{m}$). A variabilidade da caracterização tecnológica das madeiras estudadas refletiu no comportamento das mesmas frente aos processos de polpação, com vantagens observadas para o processo estendido em relação ao convencional: 5,9 % de incremento médio nos rendimentos depurados, 50% de redução média nos teores de rejeitos, 5,7% de redução média nos consumos específicos de madeira, 35,0% de incremento médio nas viscosidades das polpas e 7,0% de redução média dos teores de sólidos totais, com destaque para as madeiras mais densas. O processo estendido de polpação estudado se apresentou como uma alternativa simplificada de execução laboratorial e mais factível com a realidade industrial, quando se trata em analisar madeiras para produção de polpa celulósica. Para os estudos de qualidade da madeira que objetivam a produção de polpa celulósica, não se recomenda a análise isolada da densidade básica da madeira.

Palavras-chave: Eucalipto, Polpa celulósica, Processo estendido de polpação, Consumo específico de madeira

ABSTRACT

Impact of *Eucalyptus* wood basic density on the efficiency of extended kraft pulping processes

This research aimed to evaluate the influence of *Eucalyptus* wood basic density on the extended kraft pulping processes. For that, it was used six different genetic materials, chosen of commercial planted forests, from three Brazilian states: *E. urophylla* x *E. grandis* (**U x G**) and *E. urophylla* x *E. tereticornis* (**U x T**) – Maranhão; *E. urophylla* (**Ur**) and *E. grandis* híbrido (**HGr**) – Bahia; *E. grandis* x *E. urophylla* (**G x U**) and *E. grandis* (**Gr**) – São Paulo. These materials were characterized in terms of wood basic density, chemical composition, and fiber dimensions. Then, the materials were subjected to two pulping processes: conventional (**C**): pulping process reference and extended (**E**): a simplified laboratory simulation for modified pulping processes. Both processes were carried out targeting kappa number in brownstock pulp of $18 \pm 5\%$, and effective residual alkali concentration between 5 and 8 gNaOH/L. To achieve these premises, the applied alkali charge and the maximum temperature were adjusted. Wood physical characterization showed wood chips basic density values statistically distinct, between 0.416 (Gr) to 0.610 g/cm³ (U x T). The wood with the lowest basic density (Gr) presented chemical properties most favorable to the pulping processes, if compared to the other materials: higher holocellulose content (69.37%), lower extractives content (1.46%), and ash content (0.21%). The wood with the highest basic density showed fibers properties distinct, with a higher wall fraction (60%) and lower lumen diameter (6.76 μ m). The variability in woods characterization reflected in their behavior toward the pulping processes, with advantages observed for the extended pulping process in relation to the conventional one: 5.9% average increase in screened yield, 50% average reduction in reject content, 5.7% average reduction in specific wood consumption, 35% average increase in pulp viscosities, and 7.0% average reduction in the black liquor solids, with emphasis on the denser woods. The extended pulping process studied presented itself as a simplified alternative for laboratory execution, and more feasible with the industrial reality when it comes to analyzing woods for pulping. For wood quality studies aiming at pulping production, isolated analysis of the wood basic density is not recommended.

Keywords: Eucalypt, Pulp, Extended pulping process, Specific wood consumption

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Posicionamento do dispositivo para completa imersão da amostra de madeira. Adaptado NBR 11941 (ABNT, 2003).....	23
Figura 2. Mapa de localização geográfica dos locais de coleta.	38
Figura 3. Fotos ilustrativas da coleta e preparo de material.....	41
Figura 4. Densidade básica dos discos ao longo do eixo longitudinal.....	53
Figura 5. Variação longitudinal da densidade básica da madeira ao longo da altura comercial e modelo matemático ajustado para a madeira de <i>E. grandis</i> (híbrido).....	54
Figura 6. Índice de Heterogeneidade.....	56
Figura 7. Relação entre as densidades básicas das madeiras pelo Método do Máximo Teor de Umidade (densidade básica dos cavacos) e pelo Método da Balança Hidrostática (densidade básica dos discos).....	59
Figura 8. Teor de Umidade base seca para os materiais genéticos analisados	60
Figura 9. Distribuição por classes de espessura de acordo com a densidade básica	63
Figura 10. Distribuição percentual por classes de espessura conforme a densidade básica.....	64
Figura 11. Relação siringila/guaiacila das madeiras analisadas expressas de acordo com a densidade básica.....	67
Figura 12. A: relação entre densidade básica da madeira e largura da fibra e B: relação entre densidade básica e diâmetro do lume.....	73
Figura 13. Porosidade das madeiras expressas conforme o código e a densidade básica.	74
Figura 14. Relação entre fração parede das fibras e densidade básica da madeira..	76
Figura 15. Correlações entre teor de extrativos totais e álcali ativo (A) e entre teor de celulose e álcali ativo (B).	81
Figura 16. Relação entre os rendimentos depurados obtidos nos processos convencional (C) e estendido (E).....	84
Figura 17. Relação entre densidade básica da madeira e rendimento depurado.....	85
Figura 18. Relações entre extrativos totais e rendimentos depurados (A) e entre teor de celulose e rendimentos depurados (B)	86
Figura 19. Correlação entre relação S/G da lignina e rendimento depurado.....	87
Figura 20. Relação entre densidade básica da madeira e consumo específico de madeira.	89
Figura 21. Relação entre fator H e viscosidade das polpas não branqueadas	90
Figura 22. Relação entre rendimento depurado e viscosidade das polpas não branqueadas.....	92
Figura 23. Resultados dos ácidos hexenurônicos nas polpas expressos conforme o código e a densidade básica do material genético.	92
Figura 24. Álcali ativo consumido por tonelada de polpa celulósica produzida pelos processos de polpação convencional (C) e estendido (E).....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estudos desenvolvidos com madeiras de <i>Eucalyptus</i> spp. para produção de polpa celulósica e principais resultados.	33
Tabela 2. Informações gerais dos materiais genéticos de <i>Eucalyptus</i> estudados.....	37
Tabela 3. Dados dendrométricos dos materiais genéticos analisados.....	39
Tabela 4. Dados de inventário florestal e número de árvores coletadas.	39
Tabela 5. Condições de cozimento kraft convencional.	46
Tabela 6. Condições utilizadas no processo de polpação estendido.....	47
Tabela 7. Parâmetros determinados nas polpas celulósicas.....	47
Tabela 8. Parâmetros determinados nos licores negros.	48
Tabela 9. Valores médios de densidade básica obtidos dos discos em diferentes posições em relação à altura comercial e médias ponderadas.	52
Tabela 10. Valores médios para densidade básica dos cavacos.	57
Tabela 11. Valores médios de espessura dos cavacos.	61
Tabela 12. Valores médios para composição química da madeira.	65
Tabela 13. Constituição percentual polissacarídica das madeiras.	69
Tabela 14. Coeficientes de correlação de pearson (r) entre os parâmetros analisados.	70
Tabela 15. Valores médios das dimensões das fibras.	71
Tabela 16. Relações entre as dimensões das fibras.	75
Tabela 17. Valores médios dos resultados de polpação dos tipos convencional (C) e estendido (E).	79
Tabela 18. Teste de médias para rendimentos depurados dos processos do tipo convencional (C) e estendido (E).	83
Tabela 19. Teste de médias para consumo específico de madeira dos processos do tipo convencional (C) e estendido (E).	88
Tabela 20. Teste de médias para viscosidade das polpas dos processos do tipo convencional (C) e estendido (E).	90
Tabela 21. Número kappa corrigido.	94
Tabela 22. Teste de médias para sólidos totais, orgânicos e inorgânicos analisados dos licores negros dos processos do tipo convencional (C) e estendido (E).	95
Tabela 23. Teste de médias para teor de sólidos gerados nos processos do tipo convencional (C) e estendido (E).	97
Tabela 24. Estimativas das capacidades produtivas diária e anual de polpa celulósica a partir do processo convencional (C) e estendido (E).	98
Tabela 25. Teste de médias para álcali ativo consumido nos processos do tipo convencional (C) e estendido (E).	99
Tabela 26. Análise de variância para densidade básica ponderada.	124

Tabela 27. Análise de variância para densidade básica dos discos nas diferentes posições – <i>E. urophylla</i> x <i>E. tereticornis</i>	124
Tabela 28. Análise de variância para densidade básica dos discos nas diferentes posições – <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	124
Tabela 29. Análise de variância para densidade básica dos discos nas diferentes posições – <i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	124
Tabela 30. Análise de variância para densidade básica dos discos nas diferentes posições – <i>E. urophylla</i>	124
Tabela 31. Análise de variância para densidade básica dos discos nas diferentes posições – <i>E. grandis</i> (híbrido).....	124
Tabela 32. Análise de variância para densidade básica de cavacos.....	125
Tabela 33. Análise de variância – regressão densidade básica dos cavacos x densidade básica dos discos.....	125
Tabela 34. Análise de variância para teor de extrativos totais.....	125
Tabela 35. Análise de variância para teor de lignina total.....	125
Tabela 36. Análise de variância para teor de holocelulose.....	125
Tabela 37. Análise de variância para teor de cinzas.....	125
Tabela 38. Análise de variância para comprimento das fibras.....	126
Tabela 39. Análise de variância para largura das fibras.....	126
Tabela 40. Análise de variância para diâmetro do lúme das fibras.....	126
Tabela 41. Análise de variância para espessura de parede das fibras.....	126
Tabela 42. Análise de variância – regressão densidade básica x largura das fibras.....	126
Tabela 43. Análise de variância – regressão densidade básica x diâmetro do lúme.....	126
Tabela 44. Análise de variância – regressão densidade básica x fração parede.....	126
Tabela 45. Análise de variância para número kappa – processo convencional.....	127
Tabela 46. Análise de variância para número kappa – processo estendido.....	127
Tabela 47. Análise de variância para álcali efetivo residual – processo convencional.....	127
Tabela 48. Análise de variância para álcali efetivo residual – processo estendido.....	127
Tabela 49. Análise de variância para fator H – processo convencional.....	127
Tabela 50. Análise de variância para fator H – processo estendido.....	127
Tabela 51. Análise de variância para rendimento bruto – processo convencional.....	128
Tabela 52. Análise de variância para rendimento bruto – processo estendido.....	128
Tabela 53. Análise de variância para rendimento depurado – processo convencional.....	128
Tabela 54. Análise de variância para rendimento depurado – processo estendido.....	128
Tabela 55. Análise de variância para teor de rejeitos – processo convencional.....	128
Tabela 56. Análise de variância para teor de rejeitos – processo estendido.....	128
Tabela 57. Análise de variância para consumo específico de madeira – processo convencional.....	129
Tabela 58. Análise de variância para consumo específico de madeira – processo estendido.....	129

Tabela 59. Análise de variância para viscosidade – processo convencional.....	129
Tabela 60. Análise de variância para viscosidade – processo estendido.....	129
Tabela 61. Análise de variância para ácidos hexenurônicos – processo convencional.....	129
Tabela 62. Análise de variância para ácidos hexenurônicos – processo estendido.....	129
Tabela 63. Análise de variância para número kappa corrigido – processo convencional.....	130
Tabela 64. Análise de variância para número kappa corrigido – processo estendido.....	130
Tabela 65. Análise de variância para teor de sólidos totais – processo convencional.....	130
Tabela 66. Análise de variância para teor de sólidos totais – processo estendido.....	130
Tabela 67. Análise de variância para teor de sólidos orgânicos – processo convencional.....	130
Tabela 68. Análise de variância para teor de sólidos orgânicos – processo estendido.....	130
Tabela 69. Análise de variância para teor de sólidos inorgânicos – processo convencional.....	131
Tabela 70. Análise de variância para teor de sólidos inorgânicos – processo estendido.....	131
Tabela 71. Análise de variância para teor de sólidos gerados – processo convencional.....	131
Tabela 72. Análise de variância para teor de sólidos gerados – processo estendido.....	131
Tabela 73. Análise de variância para álcali ativo consumido – processo convencional.....	131
Tabela 74. Análise de variância para álcali ativo consumido – processo estendido.....	131
Tabela 75. Análise de variância para álcali ativo consumido por tonelada produzida – processo convencional.....	132
Tabela 76. Análise de variância para álcali ativo consumido por tonelada produzida – processo estendido.....	132
Tabela 77. Análise de variância – regressão teor de extrativos x álcali ativo (convencional).....	132
Tabela 78. Análise de variância – regressão teor de extrativos x álcali ativo (estendido).....	132
Tabela 79. Análise de variância – regressão teor de celulose x álcali ativo (convencional).....	132
Tabela 80. Análise de variância – regressão teor de celulose x álcali ativo (estendido).....	132
Tabela 81. Análise de variância – regressão rendimento depurado – c x rendimento depurado – e.....	133
Tabela 82. Análise de variância – regressão densidade básica x rendimento depurado (convencional).....	133
Tabela 83. Análise de variância – regressão densidade básica x rendimento depurado (estendido).....	133
Tabela 84. Análise de variância – regressão teor de extrativos x rendimento depurado (convencional).....	133
Tabela 85. Análise de variância – regressão teor de extrativos x rendimento depurado (estendido).....	133
Tabela 86. Análise de variância – regressão teor de celulose x rendimento depurado (convencional).....	133
Tabela 87. Análise de variância – regressão teor de celulose x rendimento depurado (estendido).....	134

Tabela 88. Análise de variância – regressão relação s/g x rendimento depurado (convencional).	134
Tabela 89. Análise de variância – regressão relação s/g x rendimento depurado (estendido).	134
Tabela 90. Análise de variância – regressão densidade básica x consumo específico de madeira (convencional).	134
Tabela 91. Análise de variância – regressão densidade básica x consumo específico de madeira (estendido).....	134
Tabela 92. Análise de variância – regressão fator H x viscosidade (convencional).....	134
Tabela 93. Análise de variância – regressão fator H x viscosidade (estendido).....	135
Tabela 94. Análise de variância – regressão rendimento depurado x viscosidade (convencional).	135
Tabela 95. Análise de variância – regressão rendimento depurado x viscosidade (estendido).....	135

1. INTRODUÇÃO

As florestas plantadas no Brasil são a principal fonte de abastecimento para as indústrias de base florestal, como a de celulose e papel. Dos 9,0 milhões de hectares de florestas plantadas no país, 7,0 milhões são com espécies do gênero *Eucalyptus*. O setor produtivo de polpa celulósica brasileiro também possui destaque mundial, tendo apresentado em 2019 produção de 19,7 milhões de toneladas, ocupando a 2ª posição entre os maiores produtores mundiais (IBÁ, 2020).

O desempenho do setor de celulose e papel no Brasil está relacionado aos investimentos feitos ao longo dos anos em tecnologias de polpação e no desenvolvimento de atividades silviculturais, principalmente com espécies do gênero *Eucalyptus*. As espécies desse gênero apresentam alta produtividade volumétrica e qualidade de madeira, resultados de técnicas silviculturais, de manejo e de melhoramento genético.

No que se refere à qualidade da madeira para produção de polpa celulósica, importantes parâmetros de avaliação dos processos alcalinos de polpação, como demanda alcalina, rendimento em polpa e consumo específico da madeira, estão intimamente ligados à madeira utilizada, ou seja, às características intrínsecas à matéria-prima em questão. Nesse sentido, empresas do setor vêm gradativamente investindo em programas de qualidade da madeira, já que o conhecimento prévio de suas características possibilita identificar potenciais gargalos de produção, embasando a elaboração do planejamento anual e garantindo melhores resultados operacionais (SEGURA *et al.*, 2017).

Entre os principais parâmetros de avaliação da qualidade da madeira para produção de polpa celulósica, encontra-se a densidade básica. Apesar de a sua determinação ser relativamente simples, a densidade básica consiste em um parâmetro complexo, que reflete as propriedades químicas, físicas e anatômicas da madeira. Para a indústria de celulose e papel, esse parâmetro relaciona-se à eficiência do processo de polpação, à qualidade da polpa celulósica produzida e indica com relativa precisão a quantidade de madeira necessária para abastecer a fábrica, pois é um dos parâmetros utilizados no cálculo do consumo específico de madeira.

Dada a sua importância e correlações com a eficiência das operações de produção de polpa celulósica, tanto em termos quantitativos como qualitativos, alguns autores cunharam a expressão densidade básica “ideal” da madeira para usos em processos de polpação (FOELKEL; SANI, 1976; FOELKEL; MORA; MENOCELLI, 1992). Historicamente, os valores de densidade básica “ideal” para a madeira de eucalipto destinada à produção de polpa celulósica já foram de 0,380, 0,421 e 0,472 g/cm³.

O uso de madeiras mais densas, com valores entre 0,600 e 0,800 g/cm³, era evitado pelos fabricantes de polpa celulósica por apresentarem dificuldades de impregnação do licor de

cozimento, geração de maior teor de rejeitos, menor rendimento depurado e dificuldades na picagem da madeira em cavacos. A literatura técnica disponível relacionada à densidade básica “ideal” da madeira de eucalipto destinada à produção de polpa celulósica é relativamente antiga, oriunda de trabalhos desenvolvidos entre as décadas de 1970 e 1990, e teve como base a avaliação do processo de polpação kraft convencional.

As modificações do processo kraft iniciaram entre as décadas de 1980 e 1990 e baseiam-se em uma melhor distribuição de energia e carga alcalina. Em processos contínuos de polpação, os princípios dos processos modificados de polpação são implementados através da melhoria da eficiência da etapa de impregnação de cavacos, divisão da carga alcalina em duas ou mais posições, etapas de cozimento em contra-corrente, utilização de filtrados da lavagem de polpas para minimizar a concentração de lignina na fase final de cozimento, menores temperaturas de cozimento, maiores tempos de reação, entre outros. As características dos processos modificados de polpação trazem como possibilidade a utilização de madeiras com maiores densidades básicas e com potencial de elevado rendimento.

Diante do contexto apresentado, essa pesquisa tem como objetivo geral avaliar a influência da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* nos processos estendidos de polpação.

Como objetivos específicos, encontram-se:

- Avaliar as associações existentes entre as densidades básicas das madeiras de seis materiais genéticos do gênero *Eucalyptus* com os parâmetros de qualidade da madeira (composição química e dimensões das fibras);
- Avaliar as associações existentes entre os parâmetros de qualidade da madeira (densidade básica e composição química) com os parâmetros de polpação;
- Propor metodologia de simulação laboratorial simplificada de processos modificados de polpação, visando a avaliação da qualidade da madeira para produção de polpa celulósica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O gênero *Eucalyptus*

O gênero *Eucalyptus*, pertencente à família *Myrtaceae*, ordem *Myrtales* e divisão Angiospermae, possui mais de 800 espécies e ocorre naturalmente na Austrália, Papua-Nova Guiné, Timor-Leste, Indonésia e Filipinas. Além do elevado número de espécies, existe também um número muito grande de variedades e híbridos. No Brasil, o cultivo de árvores de eucalipto é de grande importância, pois é a principal fonte de suprimento de madeira para as indústrias de base florestal, como a indústria de celulose e papel (ASSIS; RESENDE, 2011; BERTOLA, 2013; FLORES *et al.*, 2016).

O eucalipto foi descrito pela primeira vez em 1789 por L'Heritier e, em 1850, ocorreu a disseminação desse gênero para o mundo a partir da distribuição de sementes para a Europa (SANI; FOELKEL, 1975). É difícil determinar precisamente a data de introdução do eucalipto no Brasil devido às divergências de registros realizados por diversos autores e à falta de documentos que comprovem possíveis datas de entrada de sementes e mudas no país. Acredita-se que as primeiras mudas foram plantadas no Brasil em 1824, no Jardim Botânico do Rio de Janeiro (BERTOLA, 2013; CASTRO *et al.*, 2016). No ano de 1904 foram iniciados os primeiros estudos com o eucalipto para finalidades comerciais. No ano em questão, Edmundo Navarro de Andrade introduziu diversas espécies do gênero *Eucalyptus* em Jundiaí no estado de São Paulo, visando o estabelecimento dessa matéria-prima por conta da demanda de madeira existente na época, em especial para suprir as necessidades de lenha, postes e dormentes das estradas de ferro na região Sudeste do Brasil.

Durante as décadas de 60 e 70, até meados dos anos 80, ocorreu grande crescimento de investimentos em estudos com árvores do gênero *Eucalyptus*, o que favoreceu avanços em manejo florestal, plantio e clonagem de várias espécies de eucalipto (SAMPAIO, 1961; DOSSA *et al.*, 2002). Os programas de melhoramento genético para eucalipto foram impulsionados na década de 60, devido aos incentivos fiscais aplicados na época. Neste período, também se iniciaram progressos significativos no suprimento da madeira de eucalipto para a indústria de celulose e papel devido aos melhoramentos genéticos, técnicas de plantio, incrementos na produção de madeira e redução dos ciclos de corte (HART; SANTOS, 2015).

O eucalipto foi introduzido como matéria-prima no segmento papelheiro por volta de 1957 e, desde então, é destinado para produção de celulose de fibra curta, matéria-prima para a produção de papéis para imprimir e escrever, papéis sanitários, entre outros tipos (ABRAF, 2013). Nos últimos anos, os avanços em melhoramento genético com eucalipto foram obtidos em termos de

definição de espécies, procedências adaptadas aos ambientes de cultivo, adequação ao produto final, métodos de propagação, silvicultura clonal e hibridação (ROCHA *et al.*, 2007). Hart e Santos (2015) salientam que os eucaliptos são muito adaptáveis à formação híbrida interespecífica, pois várias de suas espécies são geneticamente próximas e frequentemente produzem híbridos naturais. Dessa maneira, com o avanço das técnicas clonais, foi possível desenvolver rapidamente plantações clonais de árvores híbridas superiores.

Os plantios de eucalipto apresentam naturalmente altas taxas de crescimento e, somado aos avanços genéticos e à introdução de clones mais produtivos, o incremento médio anual dos plantios comerciais com árvores de eucalipto no Brasil aumentou consideravelmente em relação a outros países. A produtividade média do eucalipto é de 35,3 m³/ha/ano, podendo atingir até 100 m³/ha/ano em certas regiões brasileiras, conforme estudo que analisou 15 clones de eucalipto com 7 anos de idade (FERNANDES *et al.*, 2011; IBÁ, 2020). No ano de 2016, a produtividade florestal brasileira liderou o ranking global com incremento médio anual de 35,7 m³/ha/ano para a eucaliptocultura (ACOSTA; MASTRANDREA; LIMA, 2008; IBÁ, 2016).

Em resumo, as espécies de eucalipto têm sido amplamente utilizadas em diversos setores produtivos de base florestal, devido ao seu rápido crescimento, capacidade de adaptação às diversas regiões ecológicas, pelo potencial econômico, alta produtividade florestal e menores ciclos de corte, garantindo menor tempo das taxas de retorno ao investimento florestal (SANTAROSA; JÚNIOR; GOULART, 2014).

De acordo com Pikka e Andrade (2015), polpas celulósicas de eucalipto são as mais desejáveis para produção de papéis com boa qualidade, devido às boas propriedades de suas fibras, como também à sua qualidade uniforme. Ainda segundo os mesmos autores, em 2015, aproximadamente 30 milhões de toneladas de polpa celulósica com fibras de eucalipto foram produzidas e aproximadamente 60% dessa produção era proveniente do Brasil.

Embora mais de 800 espécies de eucalipto sejam conhecidas, apenas algumas são comumente utilizadas em plantios comerciais em regiões tropicais e subtropicais, que incluem: *E. camaldulensis*, *E. dunnii*, *E. grandis*, *E. nitens*, *E. globulus*, *E. urophylla*, *E. saligna*, *E. pellita* e *E. tereticornis*, correspondendo a mais de 90% de plantios no mundo (BORRALHO, N.M, 2003; HARWOOD, 2011). No Brasil, os plantios clonais estavam distribuídos da seguinte forma: 65% *E. grandis* × *E. urophylla*, 15% *E. urophylla* híbrido, 7% *E. grandis*, 6% *E. urophylla*, 2,5% *E. saligna*, 0,6% *E. urophylla* × *E. camaldulensis*, 0,5% *E. urophylla* × *E. globulus* e 0,4% *E. camaldulensis* × *E. grandis* (ASSIS; ABAD; AGUIAR, 2015).

O desenvolvimento e a expansão do cultivo de eucaliptos no Brasil são consequências do grande envolvimento e trabalho integrado de instituições relacionadas ao setor florestal, como

universidades, institutos de pesquisa, empresas, laboratórios e associações, que atuaram junto às esferas governamentais para que fosse constituído cenário favorável ao desenvolvimento e consolidação do setor produtivo baseado no cultivo do gênero *Eucalyptus* (JUNIOR, 2014). Prova disso é a extensão de áreas plantadas com eucalipto no país que, em 2019, somavam 7,0 milhões de hectares do total de 9,0 milhões de hectares de florestas plantadas no Brasil (IBÁ, 2020).

2.2. Densidade básica

A densidade básica é uma das propriedades mais importantes da madeira e se correlaciona com as suas propriedades químicas, físicas e anatômicas. Este parâmetro também está relacionado às propriedades e características tecnológicas para produção e utilização de produtos florestais, sendo um dos principais parâmetros de avaliação da qualidade da madeira para produção de polpa celulósica (JORGE; PEREIRA, 1998; ALVES *et al.*, 2011; SANSÍGOLO; RAMOS, 2011; SIMETTI *et al.*, 2018).

A densidade básica é definida como a razão entre a massa seca de madeira e seu volume saturado, ou seja, é a quantificação direta do material lenhoso por unidade de volume. Esse parâmetro é, portanto, útil e aplicável quase que exclusivamente à madeira. As seguintes unidades de determinação da densidade básica são comumente utilizadas: g/cm³, t/m³ e kg/m³ (GRUNDELIUS, 1990; PÁDUA, 2009; FOELKEL, 2015).

Apesar da universalização do seu uso para avaliação da qualidade da madeira visando determinada finalidade, especialmente a produção de polpa celulósica, é necessário se atentar ao fato de que a densidade básica varia bastante. Essa variação ocorre tanto dentro da árvore, como entre árvores de um mesmo povoamento, espécies e gêneros, podendo variar na ordem de 0,300 a 0,800 g/cm³ para as madeiras de eucalipto (FERREIRA e KAGEYAMA, 1978; BUSNARDO *et al.*, 1987; FOELKEL *et al.*, 1992).

Vital (1984) destaca que as variações de densidade básica observadas entre as espécies se relacionam às espessuras da parede celular, dimensões das células (como da inter-relação entre esses dois fatores), da quantidade de componentes extraíveis presentes, idade da árvore, genótipo, clima, localização geográfica e tratos silviculturais aplicados. Em madeiras de folhosas, a densidade básica depende do tamanho e número de fibras, da espessura da parede da fibra e da proporção e tamanho dos elementos de vasos e outros tipos celulares (DINUS; WELT, 1997). É um parâmetro que tende a aumentar com a idade em função do aumento da espessura da parede celular e da redução da frequência dos elementos de vasos (SETTE JÚNIOR *et al.*, 2012; MENESES *et al.*, 2015).

A madeira é um material biológico heterogêneo, formada por conjunto de células com propriedades específicas, que promovem a condução de água, armazenamento e suporte mecânico (CHERELLI *et al.*, 2018). A heterogeneidade observada é resultante das variações nos sentidos radial e longitudinal que a madeira apresenta em função dos diferentes tipos de células e tecidos, também refletindo na variação da densidade básica nesses sentidos (TRUGILHO *et al.*, 2015).

Panshin e De Zeeuw (1980) descrevem que a variação longitudinal da densidade básica de eucalipto pode ocorrer segundo os modelos: (i) decrescente uniformemente com a altura, (ii) decrescente até determinado ponto e crescente até o topo da árvore e (iii) crescente da base para o topo, de maneira não uniforme. Da mesma maneira que para a variação no sentido longitudinal, não há um padrão de variação radial da densidade básica no sentido medula-casca. A maioria dos estudos aponta aumento da densidade básica no sentido medula-casca em árvores do gênero *Eucalyptus* (PÁDUA, 2009).

Para os processos de polpação, é preferível o uso de madeiras que apresentem densidade básica o mais uniforme possível, pois a impregnação do licor de cozimento para o interior da madeira ocorre de forma mais homogênea e, conseqüentemente, a delignificação da madeira também é realizada de maneira mais uniforme (ALVES *et al.*, 2011). A quantificação dos reagentes químicos utilizados na delignificação da madeira e a facilidade com que a impregnação do licor de cozimento ocorre para o seu interior estão relacionados, respectivamente, à porosidade e à permeabilidade da madeira.

Segundo Foelkel (2015), a porosidade da madeira se relaciona aos espaços vazios dos lúmens das células e aos espaços microscópicos nas paredes (como pontuações e microfraturas). Madeiras mais densas apresentam menor porosidade ou espaços vazios. Nas madeiras de eucalipto, os vazios podem representar entre 50 a 75% do volume de madeira, dependendo da sua densidade básica (FOELKEL, 2009).

A maior parte dos programas de melhoramento florestal envolvendo madeiras de eucalipto busca aumentar a produtividade volumétrica, como também melhorar as características da madeira que influenciam na sua qualidade para produção de polpa celulósica (BORRALHO; COTTERILL, 1993). Entre os parâmetros de qualidade da madeira, a densidade básica é amplamente utilizada para a seleção de árvores devido à relativa facilidade de determinação e à alta herdabilidade (FERNANDES *et al.*, 2011). Bertolucci *et al.* (1992) encontraram herdabilidade para densidade básica obtida a partir de médias de clones de eucalipto equivalente a 90,3%. Além da elevada herdabilidade, os mesmos autores observaram que a densidade básica apresentou altos valores de correlação genotípica com os principais parâmetros dos processos de polpação.

A densidade básica pode ser determinada segundo dois métodos principais: Método da Balança Hidrostática e Método do Máximo Teor de Umidade, ambas metodologias descritas segundo a NBR 11941 (ABNT, 2003). Trabalho publicado em 1971 pelos pesquisadores Foelkel, Brasil e Barrichelo foi utilizado para embasar a normatização destas metodologias pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Neste estudo, foi realizada análise comparativa entre as duas metodologias de determinação da densidade básica, utilizando-se cavacos de madeira, não tendo sido constatada diferença estatisticamente significativa entre os métodos.

O Método da Balança Hidrostática é considerado um método de deslocamento de líquido e é indicado para amostras maiores de madeira, em formatos de discos e cunhas, por exemplo. Foelkel (2015) destaca que esta metodologia se baseia em dois princípios fundamentais da física: a) impenetrabilidade: indica que dois corpos materiais não ocupam o mesmo lugar no espaço e b) Princípio de Arquimedes: um corpo, ao ser mergulhado em um líquido, desloca certo volume, que corresponderá à uma força contrária ao seu peso, denominada como empuxo.

O posicionamento da amostra de madeira para determinação da densidade básica por meio do Método da Balança Hidrostática pode ser feito acima ou abaixo da balança, até completa imersão do corpo de prova em água, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1. Posicionamento do dispositivo para completa imersão da amostra de madeira. Adaptado NBR 11941 (ABNT, 2003).

Com a amostra de madeira posicionada acima da balança, o empuxo da madeira saturada determina diretamente o seu volume. Já quando a amostra é colocada abaixo da balança, a massa imersa de madeira saturada determina a massa aparente da amostra de madeira, conforme exemplificado nas Equações a seguir:

$$\begin{aligned} MI &= MA = MU - E \\ E &= MU - MI \end{aligned} \quad (1)$$

Onde: MI: massa imersa da madeira (g);
 MA: massa aparente da madeira (g);
 MU: massa úmido da madeira (g);
 E: empuxo.

Nessa situação, o volume de madeira da amostra posicionada abaixo da balança é determinado pelo empuxo e se faz necessário fazer duas pesagens: massa aparente ou imersa e massa úmida da amostra de madeira. A densidade básica da madeira determinada pelo Método da Balança Hidrostática, com posicionamento abaixo da balança, é obtida de acordo com a Equação:

$$Db = \frac{Ms}{Mu - Mi} \quad (2)$$

Onde: Db: densidade básica (g/cm³);
 Ms: massa seca da madeira em estufa a 105 ± 2 °C (g);
 Mu: massa úmida da madeira saturada (g);
 Mi: massa imersa da madeira saturada (g).

De acordo com a NBR 11941 (ABNT, 2003), o volume do disco ou cunha é equivalente ao volume da água deslocado, representado pela diferença de massa úmida e massa imersa de madeira (Mu – Mi), considerando-se para isso a densidade relativa da água correspondente a 1 g/cm³. Essa metodologia baseia-se no conceito de forças, em que a força empuxo é obtida pela imersão do corpo de prova em água, sendo diretamente proporcional ao volume de líquido deslocado. A relação dessas forças é mensurada em massa, e transformada posteriormente em volume.

A utilização do Método do Máximo Teor de Umidade para determinação da densidade básica de amostras reduzidas de madeira, como em formato de cavacos, vem sendo amplamente empregado pelo setor produtivo de celulose e papel, tendo em vista que apresenta como principal vantagem a facilidade de execução e a necessidade de estrutura analítica relativamente simples, como balança, estufa e dessecador (FOELKEL, 2015). Segundo Smith (1954), o emprego deste método para obtenção da densidade básica requer apenas duas pesagens: uma com a amostra de madeira completamente saturada com água e outra com a amostra de madeira completamente seca, sendo que ambas as pesagens podem ser realizadas com precisão praticamente igual.

Para a correta determinação da densidade básica de amostras reduzidas de madeira por meio do Método do Máximo Teor de Umidade, duas premissas principais devem ser seguidas: a) a

madeira precisa estar no seu máximo teor de umidade para a pesagem do material saturado e b) a densidade da “substância madeira” deve ser de aproximadamente 1,530 g/cm³. As dimensões da madeira devem ser reduzidas para que a primeira condição seja atendida, sendo que o tempo total de saturação varia para cada espécie de madeira. A densidade da “substância madeira” pode variar entre 1,500 e 1,560 g/cm³, sendo assumido para utilização pelo método em questão o valor médio de 1,530 g/cm³ (FOELKEL, MILANEZ E BUSNARDO, 1983).

Foelkel, Brasil e Barrichelo (1971) deduziram a equação descrita por Smith (1954) e, considerando as premissas descritas anteriormente, concluíram que a densidade básica pelo Método do Máximo Teor de Umidade pode ser calculada de acordo com a Equação a seguir:

$$Db = \frac{1}{\frac{Mu}{Ms} - 0,346} \quad (3)$$

Onde: Db: densidade básica (g/cm³);
Mu: massa úmida da madeira saturada (g).
Ms: massa seca da madeira em estufa a 105 ±2 °C (g);
0,346: constante referente à relação entre a densidade relativa da água (1 g) e a densidade da substância madeira (1,534 g/cm³)

Segundo Smith (1954), o máximo teor de água contido por grama de madeira seca pode ser expresso de acordo com a Equação a seguir:

$$MTA = \frac{Mam (Mu - Ms)}{Ms} \quad (4)$$

Onde: MTA: Máximo teor de água (g);
Mam: massa de água na madeira após saturação (g): obtida pela diferença de massa úmida de madeira saturada (Mu) e da massa seca da madeira em estufa (Ms);

Considerando a densidade relativa da água equivalente à 1 g/cm³, o numerador expresso na Equação 4 (Mam) pode ser representado por volume de água na madeira (Vam). Dessa forma, o volume de água presente em dado volume de madeira, pode ser definido como a diferença entre o volume total (Vtot) e o volume da substância madeira (Vsm):

$$MTA = \frac{Vam (Vtot - Vsm)}{Ms} \quad (5)$$

Observa-se que a Equação 5 representa o inverso da densidade básica da madeira (Db) e da densidade básica da substância madeira (Dsm):

$$MTA = \frac{1}{Db} \frac{1}{Dsm} \quad (6)$$

Isolando a densidade básica da madeira (Db), obtém-se:

$$Db = \frac{1}{MTA + \frac{1}{Dsm}} \quad (7)$$

Substituindo-se o denominador da Equação 7 na Equação 4, e considerando a densidade da substância madeira com valor médio de 1,534, obtêm-se a equação descrita por Smith (1954), que equivale à equação deduzida e descrita posteriormente por Foelkel, Brasil e Barrichelo (1971), amplamente utilizada até os dias atuais:

$$Db = \frac{1}{\frac{Mu - Ms}{Ms} + \frac{1}{1,534}} = \frac{1}{\frac{Mu}{Ms} - 0,346} \quad (8)$$

Os estudos científicos e técnicos acerca da influência da densidade básica nos rendimentos de processo de polpação, qualidade das polpas celulósicas, custos de produção e utilização em programas de melhoramento florestal começaram a ser desenvolvidos com madeiras de eucalipto no Brasil a partir da década de 70. Os investimentos em pesquisa nesta área contribuíram para a inserção e manutenção da madeira de eucalipto na produção de polpa celulósica de fibra curta no Brasil. A seguir, são apresentados alguns dos estudos desenvolvidos ao longo dos anos.

Foelkel *et al.* (1971) pontuaram os principais aspectos para a utilização da densidade básica pelas indústrias de celulose e papel:

- A madeira é usualmente adquirida em volume e no processamento é desejável conhecer seu peso seco para o adequado controle das operações industriais, sendo possível a conversão por meio da densidade básica;
- A densidade básica é um importante fator considerado na produção de celulose, tanto em termos de rendimento por digestor individual, quanto em termos de rendimento por unidade de volume. A uniformidade da densidade básica dentro de uma dada madeira é desejável para obtenção de um produto final padronizado;
- A velocidade de impregnação da madeira pelo licor de cozimento e consequente ritmo de deslignificação são influenciados pela densidade, sendo de se esperar que, dentro de uma mesma espécie, madeiras menos densas sejam mais facilmente deslignificadas.

Foelkel e Sani (1976) indicaram uma definição de qualidade da madeira para produção de polpa celulósica, em que foi sugerido que a densidade básica ideal da madeira utilizada deveria apresentar valores baixos ou médios. Os autores sugeriram evitar o uso das espécies *Eucalyptus*

citriodora (atual *Corymbia citriodora*) e *Eucalyptus paniculata* por serem muito densas (0,600 a 0,800 g/cm³) e apresentarem alto consumo de álcali no processo de polpação, maior teor de rejeitos e dificuldade de picagem em cavacos. Neste estudo, os autores também destacaram a necessidade de se discutir de maneira mais global os vários aspectos envolvidos na utilização de madeiras densas nos processos de polpação, como a otimização dos parâmetros de processo.

No I Congresso Brasileiro sobre a Qualidade da Madeira, realizado em 1978, discutiu-se entre os produtores de polpa celulósica o conceito de densidade básica ideal das madeiras, visando a otimização do rendimento de processo e qualidade do produto final. Na ocasião, não foi recomendada a utilização de madeiras mais densas sob o argumento que as mesmas consumiam mais álcali no cozimento e resultavam em altos teores de rejeitos e, conseqüentemente, em menores rendimentos de processo. Atualmente, esse conceito pode ser considerado ultrapassado, tendo em vista os avanços em tecnologias para produção de polpa celulósica, representados pelos processos modificados de polpação, que podem minimizar o efeito da densidade básica da madeira pela etapa de impregnação dos cavacos.

Tanto a densidade básica, como o rendimento em celulose, são propriedades que conduzem a uma importante característica para o setor: o consumo específico de madeira por tonelada de polpa celulósica produzida (FOELKEL *et al.*, 1978). O consumo específico de madeira é definido como a quantidade de madeira necessária para se produzir 1 tonelada de polpa celulósica seca ao ar e é calculado a partir da densidade básica da madeira e do rendimento depurado de processo, sendo considerado parâmetro de grande importância econômica ao processo produtivo de polpa celulósica (MOLTEBERG; HØIBØ, 2007).

Foelkel *et al.* (1984) pesquisaram sobre a qualidade ideal da madeira para a produção de polpa celulósica e concluíram que economias de madeira para o processo produtivo seriam obtidas pelo aumento do rendimento e diminuição do consumo específico da madeira, utilizando-se para isso madeiras mais densas.

Em estudo que analisou as características da “árvore industrial”, foi demonstrado que a densidade básica, em conjunto com o crescimento volumétrico e rendimento de processo, são as variáveis que mais impactam a capacidade e custo de produção. Ainda de acordo com os mesmos autores, ficou demonstrado que a densidade básica é a característica que exerce maior influência na qualidade da polpa, tendo em vista que seu valor médio é utilizado para estabelecer a dosagem de carga alcalina requerida no processo de polpação (FONSECA; OLIVEIRA; SILVEIRA, 1996).

Gomes *et al.* (1998) concluíram que não existe madeira ideal para produção de polpa celulósica e sim um *mix* de madeiras, estabelecido de acordo com a necessidade fabril. Estes autores também destacaram a necessidade de se buscar, por meio do melhoramento genético, madeiras

densas com rendimentos e produtividade florestal semelhantes às madeiras menos densas, sendo que a densidade básica ideal se encontra no equilíbrio entre a capacidade produtiva do digestor e a caldeira de recuperação.

Foi concluído em estudo com dois clones híbridos de eucalipto com densidades básicas de 0,447 e 0,552 g/cm³ que a madeira menos densa se mostrou mais favorável à produção de polpa celulósica. No entanto, ainda de acordo com o mesmo estudo, o uso da madeira com menor densidade apresentou desvantagens, como o maior consumo específico de madeira e menor massa de madeira no digestor, o que afetaria o custo e a produtividade industrial (QUEIROZ *et al.*, 2004).

O custo da madeira no processo fabril varia entre 40 e 60% no custo de produção de polpa celulósica (WRIGHT, 2006). Outro fator a ser levado em consideração é a taxa de alimentação dos cavacos, um dos principais gargalos de produção de fábricas de celulose, sendo para essa situação mais interessante o uso de madeiras mais densas (LOPEZ; GOMIDE; PHILIPS, 2009).

Mokfienski (2004) estudou 10 madeiras comerciais do gênero *Eucalyptus* para produção de polpa celulósica, com densidades básicas variando entre 0,365 e 0,544 g/cm³ e concluiu que as madeiras menos densas apresentaram rendimentos de polpação mais altos, utilizando-se o processo de polpação kraft convencional. No entanto, as madeiras mais densas apresentaram menor consumo específico de madeira.

2.3. Processo de polpação kraft convencional e modificado

O processo de polpação kraft foi desenvolvido em 1879 pelo químico alemão Dahl e patentado em 1884 pelo mesmo pesquisador. O surgimento do processo kraft se deu pela necessidade verificada por Dahl de encontrar um substituto para o carbonato de sódio no ciclo de recuperação química do processo soda. Na ocasião, foi introduzido ao sistema de recuperação o sulfato de sódio, que por sua vez, sofria combustão redutiva na caldeira de recuperação, reduzindo-se a sulfeto de sódio. O sulfeto de sódio, então presente no licor de cozimento, acelerava de forma significativa as reações de deslignificação e resultava em polpas celulósicas com maiores resistências e rendimentos, se comparadas às polpas celulósicas obtidas pelo processo soda (SMOOK, 1994; MARCOCCIA *et al.*, 2000; VASCONCELOS, 2005).

O processo kraft tornou-se bastante popular, sendo responsável por mais de 95% dos processos de polpação química praticados no mundo e é o processo base para as indústrias de celulose e papel durante os últimos 50 anos (SJÖDAHL, 2006; BROWN, 2014). Este processo se baseia na utilização de uma solução alcalina forte para atacar e dissolver a lignina da madeira, sob temperatura e pressão controladas. Os principais reagentes químicos da solução aquosa utilizados

no processo kraft são o hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S) que se dissociam, formando os íons Na⁺, OH⁻, HS⁻ e S²⁻. Os íons HS⁻ e S²⁻ reagem especificamente com a lignina, não afetando a estrutura dos polissacarídeos, enquanto que os íons OH⁻ reagem tanto com a lignina, como com os polissacarídeos, degradando-os (FOELKEL, 2009; GOMIDE; GOMES, 2015).

Silva Júnior (2005) enfatiza que o principal objetivo do processo de polpação kraft é a dissolução da lignina presente na lamela média das fibras e a consequente individualização das mesmas. Para isso, os cavacos de madeira são tratados em solução aquosa de hidróxido de sódio e sulfeto de sódio, denominada licor branco, com condições aproximadas de uma a quatro horas de cozimento, com temperaturas até 170°C, à pressão elevada, em equipamentos denominados como digestores. Ainda de acordo com o mesmo autor, o tempo de cozimento dependerá do grau de deslignificação da madeira que se pretende atingir, também expresso pelo número kappa. Via de regra, 90% da lignina presente na madeira é retirada no processo de polpação, correspondendo à um número kappa da polpa celulósica entre 14 e 20 para madeiras de folhosas.

Segundo Silva Júnior; Brito(2008) e Sjöström (2013), a deslignificação da madeira durante o processo kraft convencional pode ser dividida em três fases:

- Fase inicial: ocorre durante a fase de impregnação dos cavacos de madeira, em temperaturas abaixo de 140°C. Durante essa fase, são dissolvidas a lignina e compostos de baixo peso molecular, sendo que apenas fragmentos de lignina que são pequenos suficientes para serem dissolvidos na camada S2 da parede celular são removidos. Os carboidratos da madeira são degradados muito mais rápido do que a lignina, cerca de 18,5%.
- Fase principal: ocorre em temperaturas acima de 140 ou 150°C, o que promove aumento significativo da taxa de deslignificação de acordo com o aumento da temperatura. A porcentagem de carboidratos e concentração do álcali do licor de cozimento diminuem ligeiramente. Durante essa fase, 70% de toda a lignina é dissolvida.
- Fase residual: a quantidade de carboidratos decresce significativamente e ocorre aumento do consumo de álcali, enquanto a velocidade de deslignificação diminui. A remoção da lignina nessa fase é menos seletiva e pouco intensa.

A prevalência do processo kraft em relação aos demais processos de polpação está relacionada as seguintes vantagens: versatilidade em relação ao material fibroso utilizado, sendo adaptável a praticamente todos os tipos de madeira; produção de polpas celulósicas de alta qualidade, com excelentes propriedades de resistência, o que lhe favorece muitas aplicações; possibilidade de branqueamento das polpas marrons à altos níveis de alvura, com relativa facilidade;

eficiente sistema de recuperação de reagentes químicos e, por fim, a autossuficiência na geração de energia (GOMIDE *et al.*, 1980; FANTUZZI NETO, 1997; FOELKEL, 2009).

Como desvantagens, o processo kraft apresenta: baixo rendimento de conversão da madeira em polpa celulósica devido ao extensivo ataque aos carboidratos pelo licor branco de cozimento; o forte odor dos gases produzidos, devido à formação de compostos de enxofre; altos custos de investimento de construção da fábrica e na etapa de branqueamento (GOMIDE *et al.*, 1980; FANTUZZI NETO, 1997; FOELKEL, 2009).

Apesar das características vantajosas observadas para o processo kraft, as desvantagens como baixo rendimento de processo, em conjunto a fatores ambientais e econômicos, incentivaram o desenvolvimento de novas tecnologias, denominadas modificações do processo kraft (SEGURA, 2012). As modificações do processo kraft foram direcionadas no sentido de aumentar o rendimento e a intensidade de deslignificação para viabilizar a implantação de sequências de branqueamento livre de cloro elementar (ECF – *Elemental Chlorine Free*) e totalmente livre de cloro (TCF – *Totally Chlorine Free*) como forma de reduzir o impacto ambiental (SILVA JÚNIOR; MCDONOUGH, 2002).

O desenvolvimento de modificações do processo kraft está baseado em quatro princípios básicos (IRVINE; CLARK, 1994; MARCOCCIA; LAAKSO; MCCLAIN, 1996; HERSCHMILLER, 1998):

1. O perfil de carga alcalina deve ser mantido constante ao longo do processo de cozimento, principalmente evitando-se altas concentrações de álcali no início do processo de polpação. O nivelamento das concentrações de álcali durante o cozimento permite que maior teor de álcali fique disponível para as deslignificações principal e residual;
2. A sulfidez deve ser a maior possível na fase de deslignificação inicial e no começo da fase principal. A alta concentração de íons HS^- no início da fase principal de deslignificação favorece uma deslignificação mais rápida e seletiva durante essa fase;
3. A concentração de lignina dissolvida e íons de sódio no licor deve ser tão baixa quanto possível, especialmente na fase final do cozimento, evitando-se problemas de alvura, viscosidade da polpa celulósica e maior consumo de licor branco introduzido. A diminuição da concentração de lignina e íons de sódio aumenta a taxa de deslignificação, mas não afeta a degradação dos carboidratos;
4. A temperatura deve ser mantida baixa, principalmente nas fases inicial e final do cozimento, por causa da baixa seletividade da polpação nessas fases. A taxa de despolimerização final dos polissacarídeos aumenta mais rapidamente com o aumento da temperatura do que a

taxa de deslignificação. Assim, uma baixa temperatura de polpação melhora a seletividade da polpação.

Os processos contínuos modificados de polpação foram introduzidos nas indústrias produtoras de polpas celulósicas na década de 80 (DILLNER; LARSON; TIBBLING, 1990). Entre as principais modificações desenvolvidas para digestores contínuos, destacam-se: MCC (*Modified Continuous Cooking*), EMCC (*Extended Modified Continuous Cooking*), ITC (*Isothermal Cooking*), Compact Cooking™ e Lo-Solids®. Os principais processos modificados descontínuos são *SuperBatch* e *Enerbatch*.

Os princípios dos cozimentos modificados vêm sendo aplicados aos digestores contínuos de polpação por meio de divisões na adição do licor branco ao longo do cozimento e usando do método de lavagem em contracorrente para minimizar a concentração de lignina ao final do cozimento (MIYANISHI; SHIMADA, 2001). Segundo Lindgren e Lindström (1996), a introdução da divisão da carga alcalina ao longo do processo de polpação promove a redução de perda dos carboidratos e aumento da concentração dos íons de hidróxido na fase final de cozimento, o que aumenta as reações de remoção da lignina.

As maiores vantagens observadas nas modificações do processo kraft foram os aumentos de rendimentos de processo e a seletividade, que consiste na relação entre viscosidade da polpa marrom e seu respectivo número kappa (ANDBACKA; SVANBERG, 1997). Pikka e Andrade (2015) destacaram que os estudos e desenvolvimentos acerca dos processos modificados foram realizados especialmente com madeiras de eucalipto, com vantagens observadas no aumento de rendimento, diminuição do consumo de energia e vapor, melhoria na branqueabilidade das polpas marrons e aumento da resistência das polpas celulósicas.

Brown (2014) enfatizou a importância das pesquisas e desenvolvimentos de melhorias aos processos químicos de polpação. Segundo este autor, eram previstos que os estudos desenvolvidos até 2020 para a nova geração dos processos químicos de polpação enfatizariam no aumento do rendimento de polpação em 5% base madeira, entre outros aspectos. Outro ponto relevante para os produtores de polpa celulósica é minimizar os custos de produção, principalmente os custos referentes à madeira de eucalipto. Por esse motivo, técnicas que aumentem os rendimentos de polpação vêm se tornando cada vez mais relevantes como forma de diminuir os custos com o consumo de madeira (SOUZA, *et al.*, 2018).

Visando observar os avanços das pesquisas desenvolvidas com madeiras de *Eucalyptus* spp. para produção de polpa celulósica, são apresentados na Tabela 1 alguns estudos revisados, com

ênfase nos valores médios de densidade básica das madeiras estudadas, tipo de processo de polpação empregado (convencional ou modificado) e os principais resultados de polpação obtidos.

Tabela 1. Estudos desenvolvidos com madeiras de *Eucalyptus* spp. para produção de polpa celulósica e principais resultados.

Ano	Autor	Espécie/híbrido	Idade (anos)	Densidade básica da madeira (g/cm ³)	Tipo de processo de polpação	Rendimento Bruto (%)	Teor de rejeitos (%)	Rendimento depurado (%)	Número kappa
1975	Foelkel <i>et al</i>	<i>E. tereticornis</i>	7,0	0,512	kraft convencional	46,2	2,1	44,1	16±1
		<i>E. saligna</i>	8,0	0,530		50,3	3,7	46,6	
		<i>E. maculata</i>	7,0	0,647		48,7	3,7	45,0	
		<i>C. citridodora</i>	7,0	0,637		49,2	4,7	44,5	
		<i>E. paniculata</i>	6,0	0,680		47,1	2,8	44,3	
1978	Foelkel <i>et al</i>	<i>E. urophylla</i>	4,0	0,415	kraft convencional	47,5	0,3	47,3	17,2
		<i>E. camaldulensis</i>	4,0	0,431		53,4	1,1	52,3	21,0
		<i>E. robusta</i>	4,0	0,439		45,3	0,5	44,8	18,2
		<i>E. grandis</i>	4,0	0,440		50,7	0,9	49,8	19,4
		<i>E. torelliana</i>	4,0	0,482		48,0	0,9	47,1	22,2
		<i>E. tereticornis</i>	4,0	0,507		47,4	0,9	46,5	17,7
		<i>C. citridodora</i>	5,0	0,592		52,5	1,1	51,3	19,4
		<i>E. paniculata</i>	5,0	0,669		52,2	1,6	50,7	17,5
1982	Busnardo <i>et al</i>	<i>E. urophylla</i>	7,0	0,510	kraft convencional	51,0	-	-	18,9
1982	Zvinakevicius <i>et al</i>	<i>E. grandis</i>	5,0	0,527	kraft convencional	49,3	0,9	48,4	17,6
1984	Gonzaga <i>et al</i>	<i>E. camaldulensis</i>	-	0,480	kraft	42,1	0,1	42,0	-
		<i>E. globulus</i>	-	0,565	convencional	52,1	2,1	50,0	-
1990	Miranda e Barrichelo	<i>E. saligna</i>	5,0	0,499	kraft	53,8	2,1	51,7	16,5
		<i>C. citriodora</i>	6,0	0,623	convencional	53,6	0,8	52,8	17,9

(Continuação) Tabela 1. Estudos desenvolvidos com madeiras de *Eucalyptus* spp. para produção de polpa celulósica e principais resultados.

Ano	Autor	Espécie/híbrido	Idade (anos)	Densidade básica da madeira (g/cm ³)	Tipo de processo de polpação	Rendimento Bruto (%)	Teor de rejeitos (%)	Rendimento depurado (%)	Número kappa
2004	Mokfienski	<i>E. grandis</i>	4,8	0,389	kraft convencional	55,9	0,3	55,6	15,5-16,7
		<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	5,5	0,421		51,2	0,2	51,0	
		<i>E. urophylla</i>	8,0	0,430		53,6	0,1	53,5	
		<i>E. grandis</i>	5,2	0,433		53,1	0,3	52,8	
		<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	5,5	0,525		53,8	0,3	53,5	
		<i>E. urophylla</i>	7,5	0,544		52,3	0,1	52,2	
2004	Queiroz <i>et al</i>	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	6,0	0,447	kraft	51,2	0,2	51,0	18,2
		<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	6,0	0,552	convencional	48,6	0,1	48,5	18,2
2005	Gomide <i>et al</i>	<i>E. grandis</i> (híbrido)	-	0,465	Cozimento	57,6	0,0	57,6	17,7
		<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	-	0,482	kraft	53,4	0,0	53,4	18,0
		<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	-	0,490	(simulação	54,3	0,0	54,3	17,8
		<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	-	0,505	digestor	54,5	0,0	54,5	17,8
		<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	-	0,510	contínuo)	50,2	0,0	50,2	17,8
2009	Magaton <i>et al</i>	<i>E. benthamii</i>	9,0	0,479	kraft convencional	46,6	-	-	17,2
		<i>E. grandis</i>	9,0	0,498		47,9	-	-	18,5
		<i>E. saligna</i>	9,0	0,509		46,4	-	-	17,1
2015	Carvalho <i>et al</i>	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	7,0	0,542	Lo-Solids	-	-	54,1	18,0
2016	Segura e Silva Júnior	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	6,0	0,451	Lo-Solids	54,0	0,0	54,0	18,0
		<i>C. citriodora</i>	6,0	0,568	Lo-Solids	54,1	0,0	54,1	18,5
2018	Souza <i>et al</i>	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	7,0	0,528	kraft convencional	53,0	0,5	52,5	19,1
		<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	7,0	0,528	Modificado (impregnação estendida)	53,5	0,0	53,5	19,2

Nos estudos revisados a partir dos processos de polpação kraft convencional, foram aplicadas temperaturas máximas de cozimento de 170°C, com tempo total de cozimento variando entre 120 e 150 minutos (FOELKEL *et. al.*; 1975; FOELKEL, 1978; GONZAGA *et al.*, 1984; MIRANDA; BARRICHELO, 1990; MOKFIENSKI, 2004; QUEIROZ *et al.*, 2004; ZVINAKEVICIUS *et. al.*; 1982). Já os estudos revisados que abordaram simulações dos processos modificados de polpação, foram aplicadas menores temperaturas de cozimento, entre 145 e 155°C, com maiores tempos totais de cozimento, de 235 a 276 minutos (GOMIDE *et al.*, 2005; MAGATON *et al.*, 2009; CAMARGO *et. al.*, 2015; SEGURA; SILVA JÚNIOR, 2016).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

Para a realização desse trabalho, foram utilizadas madeiras de seis materiais genéticos do gênero *Eucalyptus*, oriundos de florestas plantadas comerciais. A seleção dos materiais visou a obtenção de madeiras com valores de densidade básica distintos, a partir da base de dados da empresa detentora das áreas. Na Tabela 2 são apresentados os materiais genéticos selecionados, bem como as informações acerca dos locais de coleta.

Tabela 2. Informações gerais dos materiais genéticos de *Eucalyptus* estudados.

Material genético	Código	Idade (anos)	Local de coleta
<i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>	U x G	5	Bom Jardim/MA
<i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus tereticornis</i>	U x T	8	São João do Paraíso/MA
<i>Eucalyptus urophylla</i>	Ur	7	Lajedão/BA
<i>Eucalyptus grandis</i> (híbrido)	HGr	5	Mucuri/BA
<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i>	G x U	9	Agudos/SP
<i>Eucalyptus grandis</i>	Gr	5	São Miguel Arcanjo/SP

As coletas das árvores foram realizadas nos estados da Bahia, Maranhão e São Paulo. No Apêndice A são apresentadas as condições meteorológicas dos locais em que foram realizadas as coletas.

Na Figura 2 é apresentado o mapa de localização geográfica dos materiais coletados.

Figura 2. Mapa de localização geográfica dos locais de coleta.

3.2. Amostragem

Previamente à coleta dos materiais genéticos analisados neste estudo, foi realizado inventário florestal, delimitando-se para cada espécie estudada parcelas com dimensões de 10 x 10 m. O inventário pré-colheita consistiu nos levantamentos dos diâmetros à altura do peito (DAP) e das alturas comerciais (HC) - mensuradas a partir da base da árvore até o diâmetro do tronco equivalente a 6 cm - das árvores presentes em cada uma das parcelas. Na Tabela 3 são apresentados os valores dendrométricos médios obtidos nesta etapa.

Tabela 3. Dados dendrométricos dos materiais genéticos analisados.

Material genético	DAP	HC
	médio (cm)	média (m)
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	18,4 ($\pm$ 0,1)	20,6 ($\pm$ 0,4)
<i>E. urophylla</i> x <i>E. tereticornis</i>	12,8 ($\pm$ 0,1)	16,1 ($\pm$ 0,2)
<i>E. urophylla</i>	12,4 ($\pm$ 0,2)	12,1 ($\pm$ 0,8)
<i>E. grandis</i> (híbrido)	19,5 ($\pm$ 0,3)	22,1 ($\pm$ 0,8)
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	16,7 ($\pm$ 0,6)	23,0 ($\pm$ 2,3)
<i>E. grandis</i>	21,3 ($\pm$ 0,7)	25,2 ($\pm$ 1,5)

Valores entre parênteses referentes ao desvio padrão; DAP: diâmetro à altura do peito; HC: altura comercial.

O número de árvores coletadas por material genético foi determinado visando obter quantidade suficiente de madeira para as análises laboratoriais previstas. A seleção dos materiais genéticos foi baseada na busca por madeiras com densidades básicas mais distintas possível e, para tanto, os materiais selecionados foram oriundos de diferentes localidades, desenvolvidos sob diferentes condições edafoclimáticas e com idades variadas, características tais que refletiram na produtividade volumétrica dos mesmos. Pelos motivos mencionados, o número de árvores coletadas foi variável por material genético selecionado.

Na Tabela 4 são apresentados os dados de inventário florestal, fornecidos pela empresa detentora das áreas, bem como o número de árvores coletadas por material genético estudado.

Tabela 4. Dados de inventário florestal e número de árvores coletadas.

Material genético	IMAc/c	Espaçamento	Nº de
	(m ³ /ha/ano)	de plantio (m)	árvores coletadas
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	39,1	3,4 x 2,7	7
<i>E. urophylla</i> x <i>E. tereticornis</i>	24,2	3,0 x 3,0	10
<i>E. urophylla</i>	19,7	3,0 x 3,0	10
<i>E. grandis</i> (híbrido)	45,2	3,0 x 2,0	7
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	55,9	3,2 x 2,1	7
<i>E. grandis</i>	68,5	3,0 x 2,2	5

IMAc/c: Incremento médio anual com casca - dados fornecidos pela empresa detentora das áreas florestais.

Após a definição do número de árvores totais que seriam coletadas por material genético, foram selecionadas as árvores que apresentaram DAP médio da população, de forma aleatória, de acordo com o inventário pré-colheita.

Do total de árvores coletadas para cada material genético, 3 árvores foram selecionadas para retirada de discos em diferentes posições em relação à altura comercial, com aproximadamente

2,5 cm de espessura cada. Os discos foram retirados nos pontos: 0 (base), 25, 50, 75 e 100% da altura comercial, totalizando 5 discos por árvore e 15 discos por material genético. Os discos coletados foram devidamente identificados, descascados em campo e armazenados por árvore.

De todas as árvores coletadas, foram retirados toretes com 1 metro de comprimento nos intervalos entre 0 (base), 25, 50, 75 e 100% da altura comercial, totalizando 4 toretes por árvore coletada, referente à cada material genético. Os toretes obtidos foram devidamente identificados, separados por árvore, descascados em campo e transformados em cavacos por meio de picador semi-industrial. Após a picagem, os cavacos obtidos de cada torete foram misturados e homogeneizados, obtendo-se assim uma amostra composta por todos os toretes, correspondente ao conjunto de árvores para cada material genético analisado.

Os cavacos obtidos por material genético passaram por uma peneira para eliminação de cavacos finos, conforme ilustrado na Figura 3 G. A peneira utilizada nessa etapa era constituída por tela moeda, com furos de diâmetro equivalente a 21 mm. Em seguida à primeira remoção de finos, foram retirados de forma manual cavacos não padronizados, que apresentavam cascas e nós. Ao final dos processos descritos, os cavacos foram secos ao ar e armazenados em sacos de polietileno, devidamente identificados.

Na Figura 3 são apresentadas etapas de coleta em campo, preparo dos materiais, picagem dos toretes e seleção dos cavacos.

Figura 3. Fotos ilustrativas da coleta e preparo de material. A – Escolha das árvores após medição do DAP; B – Coleta de árvore selecionada; C – medição da altura total, comercial e seccionamento da tora; D – Toretas de madeira para produção de cavacos; E – Discos de madeira obtidos nas diferentes alturas; F – Picagem dos toretas em picador semi-industrial; G- Seleção dos cavacos.

3.3. MÉTODOS

3.3.1. Densidade básica

3.3.1.1. Densidade básica dos discos

As densidades básicas dos discos coletados nas diferentes posições em relação à altura comercial foram determinadas por meio do Método da Balança Hidrostática, descrito na NBR 11941 (ABNT, 2003). Primeiramente, foram medidos os diâmetros sem casca de cada disco com duas medições perpendiculares, utilizando-se régua milimétrica. O diâmetro final de cada disco correspondeu à média aritmética desses valores. Em seguida, os discos foram colocados em tanque com água, até completa saturação dos mesmos. Os discos foram então seccionados em quatro cunhas, selecionando-se duas cunhas opostas e sem defeitos para determinação da densidade básica.

As densidades básicas das cunhas foram calculadas de acordo com a Equação 10.

$$Db = \frac{Ms}{Mu - Mi} \quad (10)$$

Onde: Db: densidade básica (g/cm³);
 Ms: massa seca da madeira em estufa a 105 ± 2 °C (g);
 Mu: massa úmida da madeira saturada (g);
 Mi: massa imersa da madeira saturada (g).

Os resultados de densidade básica dos discos nas diferentes alturas foram reportados como sendo a média aritmética das duas cunhas analisadas. A partir dos resultados obtidos, foram calculadas as densidades básicas médias ponderadas, para cada material genético, de acordo com a Equação 11.

$$Dbp = \frac{1}{2} \cdot \frac{((D^2_0 + D^2_{25\%}) \cdot (d_0 + d_{25\%}) \dots + (D^2_{75\%} + D^2_{100\%}) \cdot (d_{75\%} + d_{100\%}))}{D^2_0 + D^2_{100\%} + 2 \cdot (D^2_{25\%} + D^2_{50\%} + D^2_{75\%})} \quad (11)$$

Onde: Dbp: densidade básica ponderada (g/cm³);
 D₍₀₎, D_(25%), D_(50%), D_(75%) e D_(100%): diâmetro dos discos em diferentes alturas com casca e sem casca (cm);
 d₍₀₎, d_(25%), d_(50%), d_(75%) e d_(100%): densidade básica a diferentes alturas (g/cm³).

Para cada material genético estudado, foi calculado o Índice de Heterogeneidade, que expressa a variabilidade da densidade básica no sentido longitudinal, de acordo com a Equação 12.

Os resultados reportados para o Índice de Heterogeneidade correspondeu à média aritmética das árvores analisadas de cada material genético.

$$IH = 4 \cdot (|d_0 - d_{25\%}|) + 3 \cdot (|d_0 - d_{50\%}|) + 2 \cdot (|d_0 - d_{75\%}|) + 1 \cdot (|d_0 - d_{100\%}|) + 3 \cdot (|d_{25\%} - d_{50\%}|) + 2 \cdot (|d_{25\%} - d_{75\%}|) + 1 \cdot (|d_{25\%} - d_{100\%}|) + 2 \cdot (|d_{50\%} - d_{75\%}|) + 1 \cdot (|d_{50\%} - d_{100\%}|) + 1 \cdot (|d_{75\%} - d_{100\%}|) \quad (12)$$

Onde: IH: Índice de heterogeneidade;
 $d_0, d_{25\%}, d_{50\%}, d_{75\%}$ e $d_{100\%}$ = densidade básica nas diferentes alturas das árvores (g/cm³).

3.3.1.2. Densidade básica dos cavacos

A densidade básica dos cavacos foi determinada de acordo com o Método do Máximo Teor de Umidade, descrito na NBR 11941 (ABNT, 2003). Foram tomadas 5 amostras de cavacos com aproximadamente 100 g cada, referentes a cada material genético. A densidade básica da madeira foi calculada de acordo com a Equação 13.

$$Db = \frac{1}{\frac{Ms}{Mu} - 0,346} \quad (13)$$

Onde: Db: densidade básica (g/cm³);
 Ms: massa seca da madeira em estufa a 105 ±2 °C (g);
 Mu: massa úmida da madeira saturada (g).
 0,346: constante referente à relação entre a densidade relativa da água (1 g) e a densidade da substância madeira (1,534 g/cm³)

Como análise complementar, foi calculado o teor de umidade na base seca, conforme a Equação 14.

$$TU = \frac{Mu - Ms}{Ms} \cdot 100 \quad (14)$$

Onde: TU: teor de umidade base seca (%);
 Mu: massa úmida da madeira saturada (g);
 Ms: massa seca da madeira em estufa a 105 ±2 °C (g).

3.3.2. Espessura dos cavacos

A mensuração das espessuras dos cavacos consistiu na medição individual de cada cavaco presente em amostras com 250 g cada, referentes a cada material genético. Os cavacos foram medidos com uso de paquímetro digital e separados por classes, com amplitude de 0,5 mm cada.

Após as medições e classificações, as amostras de cavacos foram colocadas em estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ até atingirem massa constante. Com base na massa seca total e na massa seca de cada classe, foi calculada a porcentagem em massa de cada classe de cavacos para as amostras analisadas.

3.3.3. Composição química da madeira

A composição química das madeiras estudadas foi analisada segundo os parâmetros de teores de extrativos totais, lignina (Klason, solúvel e total), holocelulose, relação siringila/guaiacila da lignina, composição polissacarídica (arabinanas, galactanas, mananas, xilanas e glicanas) e teor de cinzas.

Para a determinação desses parâmetros, foram utilizadas aproximadamente 100 g de cavacos correspondente a cada material genético. Os cavacos foram reduzidos à serragem, utilizando-se moinho de facas. As serragens obtidas foram classificadas conforme metodologia descrita na norma TAPPI T 257 cm-85, utilizando-se a fração de serragem com granulometria entre 40 e 60 mesh.

As análises para a determinação dos teores de extrativos totais e lignina (Klason, solúvel e total) foram realizadas em triplicata por material genético, conforme metodologia descrita no Apêndice B. O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma TAPPI T211, em triplicata por material genético. O teor de holocelulose foi calculado segundo a Equação 15.

$$\text{Holocelulose (\%)} = 100 - ((\text{Extrativos(\%)} + \text{Lignina(\%)}) \quad (15)$$

Onde: Extrativos (%): teor de extrativos totais (%);
Lignina (%): teor de lignina total (%).

A análise da relação siringila/guaiacila da lignina foi determinada por cromatografia líquida após oxidação da serragem com nitrobenzeno, conforme metodologia descrita por Lin e Dence (1992). A composição polissacarídica das madeiras foi realizada conforme norma SCAN CM 71 (2009). As análises da relação siringila/guaiacila e composição polissacarídica foram realizadas em duplicata por material genético.

3.3.4. Dimensões das fibras

Para determinação das dimensões das fibras das madeiras estudadas, foram utilizados cerca de 50 g de cavacos de cada material genético, dos quais foram retirados fragmentos de madeira para o processo de maceração. Os fragmentos de madeira foram colocados em tubo de ensaio com solução de peróxido de hidrogênio e ácido acético, em proporção de 1:1, e mantidos em estufa a 60°C por 48 horas, promovendo a individualização dos elementos anatômicos. Em seguida, os materiais foram retirados dos tubos de ensaios e lavados com água destilada até completa remoção das substâncias utilizadas na etapa de maceração.

Após a dissociação dos materiais, foram montadas 10 lâminas por material genético, com adição de 1 gota de safranina, 1 gota de glicerina e 1 gota de água. Na sequência, foram obtidas imagens para cada material estudado, utilizando-se microscópio óptico com câmera digital acoplada. Por meio do software *Image Pro Plus* foram realizadas as medições de 10 fibras por lâmina (totalizando 100 medições de fibras por material genético) referentes aos comprimentos, larguras e diâmetros do lume das fibras. Os aumentos utilizados foram 25 x (medida comprimento) e 400 x (medidas de largura e diâmetro do lume)

Os resultados foram reportados como sendo a média aritmética das 100 medições efetuadas para cada material genético.

A partir das dimensões de fibras obtidas, foram calculadas as seguintes relações:

$$EP = \left(\frac{L - DL}{2} \right) \quad (16)$$

$$FP = \left(\frac{2 \cdot EP}{L} \right) \cdot 100 \quad (17)$$

$$CF = \left(\frac{DL}{L} \right) \cdot 100 \quad (18)$$

$$IR = \frac{2 \cdot EP}{DL} \quad (19)$$

Onde: EP: espessura da parede (μm);
L: largura da fibra (μm);
DL: diâmetro do lume (μm);
FP: fração parede (%).
CF: coeficiente de flexibilidade (%)
IR: Índice de Runkel

Foi analisada a relação entre as dimensões transversais das fibras estudadas com a porosidade das madeiras, calculada conforme a Equação 20.

$$\text{Por (\%)} = (\text{vol. vazios da madeira} / \text{vol. total da madeira}) \cdot 100$$

$$\text{Por (\%)} = \left[\frac{(1/\text{Db}) - (1/1,534)}{1/\text{Db}} \right] \cdot 100 \quad (20)$$

Onde: Por: porosidade da madeira (%);
 Db: densidade básica da madeira (g/cm³);
 1,534: densidade da substância madeira (g/cm³).

3.3.5. Processos de polpação

Para obtenção das polpas celulósicas foram realizados, em escala laboratorial, processos de polpação kraft dos tipos convencional (C) e estendido (E). Os cozimentos foram realizados em triplicata por material genético, visando a obtenção de polpas celulósicas branqueáveis com número kappa $18 \pm 5\%$ ($\pm 0,9$) e álcali efetivo residual do licor entre 5 e 8 gNaOH/L. Para atingir esses parâmetros, a carga alcalina aplicada e a temperatura máxima de cozimento foram as variáveis de controle em ambos os tipos de processos de polpação analisados.

3.3.5.1. Processo de polpação kraft convencional

Os cozimentos foram realizados em digestor de circulação forçada, com dois vasos individuais com 10 litros de capacidade cada, modelo TSI. Em cada cozimento, foi utilizada uma amostra de cavacos equivalente a 700 g absolutamente secos (a.s.). Na Tabela 5 são apresentadas as condições de cozimento aplicadas nessa etapa.

Tabela 5. Condições de cozimento kraft convencional.

Parâmetros	
Álcali ativo (como NaOH, %)	variável
Sulfidez (%)	32
Relação licor/madeira (L.kg ⁻¹)	4
Temperatura máxima (°C)	variável
Tempo de aquecimento (min)	90
Tempo de cozimento (min)	60

3.3.5.2. Processo de polpação kraft estendido

Os processos de polpação kraft estendido foram realizados em digestor de circulação forçada, com dois vasos de aço inoxidável com capacidade de 10 litros cada, modelo TSI. Para essa

etapa, foram utilizadas amostras de cavacos com 700 g absolutamente secos, referentes a cada material genético. Na Tabela 6 são apresentadas as condições de cozimento aplicadas para o processo de polpação estendido.

Tabela 6. Condições utilizadas no processo de polpação estendido.

Parâmetros	
Álcali ativo (como NaOH, %)	variável
Sulfidez (%)	32
Relação licor/madeira (L.kg ⁻¹)	4
Temperatura máxima (°C)	variável
Tempo de aquecimento (min)	60
Tempo de cozimento (min)	180

3.3.5.3. Análises das polpas celulósicas

Ao final dos processos de polpação dos tipos convencional e estendido, as polpas celulósicas obtidas foram lavadas com água corrente à temperatura ambiente em caixa com fundo de tela de aço inox de 150 mesh, por um período aproximado de 12 horas (*over-night*). Visando a remoção e quantificação dos rejeitos, as polpas obtidas foram depuradas utilizando-se depurador laboratorial com fenda de 0,2 mm. Posteriormente, as polpas marrons obtidas pelos dois tipos de processos de polpação foram analisadas de acordo com os parâmetros descritos na Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros determinados nas polpas celulósicas.

Parâmetro	Norma/procedimento
Número kappa	TAPPI Methods – T236 cm-85
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 0,2 mm de depurador laboratorial) e a massa a.s.* de madeira
Viscosidade	TAPPI Methods – T230 om-94
Ácidos hexenurônicos	TAPPI Methods – T282 pm-07

*massa a.s: massa absolutamente seca

3.3.5.3.1. Consumo específico de madeira

O consumo específico de madeira (CEm) foi calculado de acordo com as Equação 21.

$$CEm = \left(\frac{1}{dB \cdot RD} \right) \cdot 0,9 \quad (21)$$

Onde: CEm: consumo específico de madeira (m³/t_{sa});
 Db: densidade básica da madeira dos cavacos (g/cm³);
 RD: rendimento depurado (decimal);
 0,9: fator de conversão para t_{sa} (tonelada seca ao ar), considerando polpa com 10% de umidade;

3.3.5.3.2. Número kappa corrigido

O número kappa corrigido, sem a participação dos ácidos hexenurônicos (LI; GELLERSTEDT, 1997), foi calculado de acordo com a Equação 22.

$$KC = NK - \left(\frac{H}{11,6} \right) \quad (22)$$

Onde: KC: número kappa corrigido da polpa marrom;
 NK: número kappa da polpa marrom;
 H: teor de ácidos hexenurônicos da polpa marrom (μmol/g);
 11,6: fator de conversão do teor de ácidos hexenurônicos em número kappa.

3.3.5.4. Análises dos licores negros

Uma amostra com aproximadamente 30 ml de licor negro foi coletada ao final de cada processo de polpação, tanto do tipo convencional como estendido, e armazenada em frascos âmbar. As amostras de licor negro foram analisadas segundo os parâmetros descritos na Tabela 8.

Tabela 8. Parâmetros determinados nos licores negros.

Parâmetro	Norma
Álcali efetivo residual (base NaOH)	TAPPI Methods T625 cm-85
Teor de sólidos totais	TAPPI Methods 650 om- 89
Teor de matéria orgânica	TAPPI Methods T625 cm-85
Teor de matéria inorgânica	TAPPI Methods T625 cm -85

3.3.5.5. Teor de sólidos gerados por tonelada de polpa celulósica produzida

O teor de sólidos gerados por tonelada de polpa celulósica produzida foi calculado de acordo com a Equação 23.

$$\text{tss/adt} = \frac{(1 - \text{RB}) + \text{AA}}{\text{RD}} \cdot 0,9 \quad (23)$$

Onde: tss/adt: teor de sólidos gerados por tonelada de polpa celulósica (t/tsa);
 RB: rendimento bruto (decimal);
 RD: rendimento depurado (decimal);
 AA: álcali ativo aplicado (decimal);
 0,9: fator de conversão para tsa (tonelada seca ao ar), considerando polpa com 10% de umidade.

3.3.5.6. Álcali ativo consumido por cozimento

O álcali ativo consumido por cozimento foi obtido de acordo com a Equação 24.

$$\text{AAC} = \text{AAA} - \text{AAR} \quad (24)$$

Onde: AAC: álcali ativo consumido por cozimento, base NaOH (g/L);
 AAA: álcali ativo aplicado (g/L);
 AAR: álcali ativo residual (g/L);

3.3.5.7. Álcali ativo consumido por tonelada de polpa celulósica produzida

O álcali ativo consumido por tonelada de polpa celulósica produzida foi calculado de acordo com a Equação 25.

$$\text{AACC} = \frac{\text{AAC} \cdot \text{LM}}{\text{RD}} \cdot 0,9 \quad (25)$$

Onde: AACC: álcali ativo consumido por tonelada de celulose, base NaOH (kg/tsa);
 LM: relação licor/madeira, em (L/kg);
 RD: rendimento depurado (em decimal).

3.4. ANÁLISE DE DADOS

O delineamento experimental aplicado nesse estudo foi o inteiramente casualizado. Os dados obtidos foram avaliados por meio da estatística descritiva (média, desvio padrão e coeficiente de variação), com exceção dos resultados da composição polissacarídica da madeira e da relação siringila/guaiacila da lignina, os quais foram reportados apenas como a média das duas repetições realizadas.

A homogeneidade de variância dos dados foi verificada pelo teste de Levene e a normalidade dos resíduos por meio do teste Shapiro-Wilk. Foi aplicada a Análise de Variância (ANOVA) de uma via, seguida do teste de Tukey com 5% de significância. Para as análises de correlação linear simples entre dois parâmetros de interesse, foi aplicado o Coeficiente de Correlação de Pearson (r), admitindo nível de significância de 5% pelo teste t de Student. Nos casos em que foram ajustados modelos por regressão linear simples, foi selecionado o modelo que apresentou o maior coeficiente de determinação (R^2).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Densidade básica

Nos itens discutidos a seguir, serão apresentados os resultados obtidos nas análises de densidades básicas, resultantes de duas metodologias distintas. Na determinação da densidade básica pelo Método da Balança Hidrostática, foram utilizados discos de madeira coletados em diferentes alturas em relação à altura comercial. Para o Método do Máximo Teor de Umidade, foram utilizadas amostras compostas de cavacos.

4.1.1. Densidade básica dos discos

O estudo da densidade básica utilizando-se discos em diferentes alturas é realizado com o intuito de se observar a variabilidade desse parâmetro ao longo do eixo longitudinal das árvores. Como conseguinte, é possível inferir por meio dessa metodologia a homogeneidade da densidade básica no sentido base-topo da árvore, característica desejável para os processos de polpação.

Na Tabela 9 são apresentados os valores médios de densidade básica dos discos obtidos nas diferentes posições em relação à altura comercial. Para cada material genético, as densidades básicas médias finais foram reportadas como médias ponderadas, considerando-se o volume entre as seções dos quais os discos foram retirados como fator de ponderação.

Tabela 9. Valores médios de densidade básica obtidos dos discos em diferentes posições em relação à altura comercial e médias ponderadas.

Material genético	Posição em relação à altura comercial					Média ponderada (g/cm³)
	0%	25%	50%	75%	100%	
Densidade básica (g/cm³)						
<i>E. urophylla</i> x <i>E. tereticornis</i>	0,666 0,011 (1,6%)	0,632 0,003 (0,5%)	0,638 0,004 (0,6%)	0,630 0,009 (1,5%)	0,650 0,033 (5,0%)	0,641 a 0,005 (0,8%)
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	0,503 0,013 (2,5%)	0,501 0,013 (2,7%)	0,504 0,004 (0,9%)	0,515 0,010 (2,0%)	0,524 0,026 (4,9%)	0,505 b 0,008 (1,7%)
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	0,472 0,018 (3,8%)	0,466 0,012 (2,6%)	0,466 0,006 (1,4%)	0,487 0,014 (2,8%)	0,485 0,006 (1,3%)	0,471 b 0,009 (1,8%)
<i>E. urophylla</i>	0,442 0,010 (2,3%)	0,433 0,028 (6,4%)	0,441 0,022 (5,0%)	0,436 0,014 (3,2%)	0,420 0,009 (2,2%)	0,437 c 0,011 (2,5%)
<i>E. grandis</i> (híbrido)	0,443 0,011 (2,5%)	0,427 0,003 (0,8%)	0,425 0,002 (0,5%)	0,414 0,018 (4,4%)	0,401 0,013 (3,3%)	0,427 cd 0,004 (1,0%)
<i>E. grandis</i>	0,406 0,019 (4,6%)	0,382 0,046 (12,2%)	0,388 0,030 (7,6%)	0,412 0,021 (5,1%)	0,443 0,027 (6,0%)	0,395 d 0,024 (6,1%)

Os valores nas células representam respectivamente: média, desvio padrão e coeficiente de variação (entre parênteses). Para os resultados de densidade ponderada, as médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

Nesse estudo, a análise de madeiras com densidades básicas distintas visou observar a influência desse parâmetro sobre a qualidade da madeira na produção de polpa celulósica. Essa premissa foi atendida, conforme observado nos resultados apresentados na Tabela 9, uma vez que os valores das médias ponderadas variaram entre 0,395 e 0,641 g/cm³. Complementarmente, o teste de médias demonstrou que a média ponderada obtida para o híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus tereticornis* diferiu estatisticamente das demais, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

Para melhor visualização dos resultados de densidade básica dos discos ao longo do eixo longitudinal, são apresentados na Figura 4 os valores médios plotados.

Figura 4. Densidade básica dos discos ao longo do eixo longitudinal. U x T: *E. urophylla* x *E. tereticornis*; G x U: *E. grandis* x *E. urophylla*; U x G: *E. urophylla* x *E. grandis*; Ur: *E. urophylla*; HGr: *E. grandis* (híbrido); Gr: *E. grandis*.

Comparativamente aos estudos disponíveis na literatura, para o híbrido de *E. urophylla* x *E. tereticornis*, não foram encontrados estudos que avaliassem a densidade básica da madeira. Oliveira *et al.* (2006) observaram densidade básica para a madeira de *Eucalyptus tereticornis* pelo Método da Balança Hidrostática equivalente a 0,660 g/cm³, valor próximo ao obtido para o híbrido de *E. urophylla* x *E. tereticornis* aqui avaliado.

Para o híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, foi obtida densidade básica média ponderada de 0,499 g/cm³ em estudo realizado por Segura (2015), valor levemente inferior ao observado na Tabela 9, e variação no eixo longitudinal semelhante ao encontrado neste estudo, com diminuição na posição 25% e aumento uniforme até o topo. A mesma tendência de variação longitudinal foi obtida para este híbrido em estudo realizado por Carvalho (2000). Em estudo realizado por Gonzalez *et al.* (2014), foi obtida para o híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* densidade básica ponderada de 0,510 g/cm³, valor superior ao observado neste estudo, porém com variação longitudinal semelhante.

A madeira de *Eucalyptus urophylla* avaliada neste estudo variou no eixo longitudinal de forma distinta, se comparado ao comportamento observado por Santos (2018), em que se obteve maior valor de densidade básica na base. Ainda de acordo com essa autora, foi observada menor densidade no topo, tendência semelhante à obtida para o material avaliado neste estudo e com densidade básica média ponderada de 0,500 g/cm³.

Já para a madeira de *Eucalyptus grandis*, observou-se variação longitudinal decrescente na posição 25% e crescente a partir desse ponto, mesma tendência observada por Carvalho (2000).

Alzate *et. al.*, (2005) observaram comportamento diferente, com decréscimo até 50% da altura comercial, seguido de aumento até o ápice, e densidade média ponderada para essa espécie de 0,460 g/cm³, valor superior ao obtido neste estudo.

Os resultados de densidade básica resultantes das diferentes posições em relação à altura comercial foram avaliados por meio da Análise de Variância (Apêndice C). Essa análise demonstrou não haver diferença estatística significativa entre as médias das densidades básicas nas diferentes alturas para os materiais genéticos analisados, com exceção ao *E. grandis* (híbrido)

Diante disso, foi ajustado modelo matemático por meio de regressão linear simples apenas para o *E. grandis* (híbrido). O modelo selecionado foi o que resultou em maior coeficiente de determinação (R²). Na Figura 5 é apresentado o gráfico de dispersão com os valores médios obtidos em cada posição em relação ao eixo longitudinal, bem como também os valores estimados pelo modelo matemático ajustado para as demais posições.

Figura 5. Variação longitudinal da densidade básica ao longo da altura comercial e modelo matemático ajustado (x corresponde à posição na árvore e y à densidade básica da madeira) para a madeira de *E. grandis* (híbrido) *Significativo a 95% de probabilidade ($p < 0,05$).

Por ser um material heterogêneo, a madeira pode apresentar variações de densidade básica tanto no sentido radial, como no sentido longitudinal. Na Figura 5 é possível observar a variação no sentido longitudinal em função da densidade básica para a madeira de *E. grandis* (híbrido). Observa-se maior valor de densidade básica na base (posição 0%), seguida de diminuição até a última proporção em relação à altura comercial. A variação observada encontra-se de acordo com 1º modelo de variação longitudinal proposto por Panshin e De Zeeuw (1980) para madeiras de eucalipto, em que é descrito variação decrescente conforme a altura.

Na Figura 5 foram plotadas as barras de erros referentes ao conjunto de dados analisados em cada posição em relação ao eixo longitudinal, expressos como a medida de dispersão de desvio padrão. Observa-se que os maiores desvios padrões foram obtidos nas posições de 75 e 100%, respectivamente 0,018 e 0,013 g/cm³ e que correspondem aos coeficientes de variação de 4,4 e 3,3% (Tabela 9). Nas demais posições, os desvios padrões foram menores, conferindo maior uniformidade ao conjunto de dados das posições 0, 25 e 50%.

Na NBR 11941 (ABNT, 2003) não há referência em relação ao erro mínimo permitido para o Método da Balança Hidrostática para obtenção da densidade básica de discos, não sendo possível avaliar por um critério pré-estabelecido a precisão desta análise. Nesse sentido, a precisão do Método da Balança Hidrostática foi verificada neste estudo utilizando-se o coeficiente de variação do conjunto de dados obtido. O coeficiente de variação é uma medida de dispersão amplamente utilizada para estimar a precisão de experimentos e tem por vantagem caracterizar a dispersão dos dados em relação ao valor médio (BRANDÃO, 2013; FARIA FILHO; JARUCHE; LEAL, 2016).

Os coeficientes de variação dos dados de densidade básica dos discos para os materiais genéticos estudados variaram entre 3,0 e 8,3%, correspondentes respectivamente ao híbrido de *E. urophylla* x *E. tereticornis* e a espécie de *E. grandis*. Pimentel Gomes (2009) considera como valores baixos de coeficientes de variação experimental quando são inferiores a 10%. Partindo-se desse princípio, os coeficientes de variação calculados para densidade básica dos discos indicam que houve baixa taxa de dispersão de dados em relação à média, demonstrando que o experimento realizado apresentou boa precisão. Comparativamente à metodologia descrita pela TAPPI 258 om-02 (2006) para densidade básica dos discos pelo princípio da imersão da madeira, a repetibilidade do método é reportada como sendo de 6%, valor próximo ao obtido neste estudo.

Com o intuito de demonstrar a uniformidade da densidade básica no eixo base-topo, foram calculados os Índices de Heterogeneidade dos materiais genéticos analisados. Este índice expressa a maior ou menor variabilidade da densidade básica no eixo longitudinal das árvores, utilizando-se para isso os valores obtidos de densidade básica a partir dos discos em diferentes proporções em relação à altura comercial. Na Figura 6 são apresentados os resultados obtidos deste parâmetro, expressos de acordo com a densidade básica ponderada de cada material genético.

Figura 6. Índice de Heterogeneidade – U x T: *E. urophylla* x *E. tereticornis*; G x U: *E. grandis* x *E. urophylla*; U x G: *E. urophylla* x *E. grandis*; Ur: *E. urophylla*; HGr: *E. grandis* (híbrido); Gr: *E. grandis*.

Conceitualmente, quanto mais próximo o Índice de Heterogeneidade se encontra de zero, maior uniformidade é observada no sentido base-topo em termos de densidade básica (BARRICHELO; BRITO, 1984). Conforme os resultados apresentados na Figura 6, é possível inferir que todos os materiais estudados são homogêneos no eixo longitudinal quanto a densidade básica, tendo em vista que os resultados obtidos para o Índice de Heterogeneidade variou entre 0,156 e 0,375, valores considerados baixos.

No estudo base para o desenvolvimento do Índice de Heterogeneidade foram obtidos índices variando entre 0,342 a 1,826 e valor médio de 0,908, utilizando-se 25 árvores de *E. grandis* (BARRICHELO; BRITO, 1984). Para o híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla*, Segura (2015) obteve valor médio para esse índice de 0,414. Já em estudo desenvolvido por Duarte (2006), foram observados para esse mesmo híbrido índices de heterogeneidade variando entre 0,282 e 0,400. Gonzalez *et al.* (2014) obtiveram índices de heterogeneidade para o híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis* variando entre 0,216 a 1,117, com valor médio de 0,631. Comparativamente aos estudos mencionados, os índices calculados neste estudo apresentaram valores médios inferiores.

Considerando os resultados obtidos para as densidades básicas dos discos nas diferentes proporções em relação ao eixo longitudinal, como também os baixos Índices de Heterogeneidades observados, pode-se inferir que os materiais genéticos analisados são uniformes em termos de densidade básica no sentido base-topo para as árvores estudadas.

4.1.2. Densidade básica dos cavacos

A densidade básica dos cavacos, obtida por meio do Método do Máximo Teor de Umidade, é amplamente utilizada pelo setor de celulose e papel, sendo comumente o primeiro parâmetro de qualidade da madeira avaliado para produção de polpa celulósica. Na Tabela 10 são apresentados os resultados médios obtidos para a densidade básica dos cavacos referente a cada material genético avaliado.

Tabela 10. Valores médios para densidade básica dos cavacos.

Material genético	Densidade básica dos cavacos (g/cm ³)
<i>E. urophylla</i> x <i>E. tereticornis</i>	0,610 a 0,005 (0,8%)
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	0,513 b 0,003 (0,7%)
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	0,487 c 0,011 (2,2%)
<i>E. urophylla</i>	0,465 d 0,007 (1,5%)
<i>E. grandis</i> (híbrido)	0,445 e 0,008 (1,8%)
<i>E. grandis</i>	0,416 f 0,009 (2,2%)

Os valores nas células representam respectivamente: média, desvio padrão e coeficiente de variação (entre parênteses). As médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

Os resultados apresentados na Tabela 10 seguiram a mesma tendência observada para os resultados reportados de densidade básica dos discos, em que o maior valor obtido foi para o híbrido de *E. urophylla* x *E. tereticornis* e o menor para o *E. grandis*, 0,610 e 0,416 g/cm³, respectivamente. Estatisticamente, as médias de densidade básica dos cavacos para esses dois materiais também apresentaram diferença significativa, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

Conforme a literatura consultada, foram observadas para o híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla* densidades básicas dos cavacos variando de 0,501 a 0,525 g/cm³, valores próximos aos obtido neste estudo e seguindo a mesma metodologia empregada (BASSA *et al.*, 2007; SANTOS e SANGÍGOLO, 2007; MOKFIENSKI e COLODETTE, 2008 e BONFATTI JÚNIOR, 2014). Para a madeira de *E. grandis*, também foram observados valores médios de densidade básica dos cavacos semelhantes ao descrito na Tabela 10, 0,424 e 0,415 g/cm³, em estudos realizados por Bassa (2002) e Padula (2013).

Para o *E. urophylla*, Mokfienski e Colodette (2008) obtiveram densidade básica de 0,430 g/cm³, valor inferior ao obtido para esse material genético analisado neste estudo. Em estudo com 5 clones de *E. tereticornis*, observou-se densidade básica média dessa espécie equivalente a 0,593 g/cm³ (AGGARWAL; CHAUHAN, 2013). Não foram encontrados estudos que avaliassem a densidade básica para o híbrido de *E. urophylla* x *E. tereticornis* pelo Método do Máximo Teor de Umidade.

Em relação à precisão experimental da densidade básica por meio do Método do Máximo Teor de Umidade, não há referência na NBR 11941 (ABNT, 2003) quanto à essa análise. Tomando-se como base a repetibilidade descrita na TAPPI 258 om-02 (2006) para densidade básica de cavacos como sendo 1,21%, observa-se que os materiais genéticos de *E. urophylla* x *E. tereticornis* e de *E. grandis* x *E. urophylla* apresentaram valores de coeficientes de variação abaixo do valor mencionado, respectivamente 0,82 e 0,68% (Tabela 10). Apesar dos demais materiais genéticos terem apresentado coeficientes de variação acima do indicado pela TAPPI 258 om-02 (2006), observa-se que os valores de coeficientes de variação obtidos são considerados baixos, entre 1,5 e 2,2%.

Para ambas metodologias utilizadas na determinação da densidade básica, observou-se que os resultados obtidos seguem a mesma tendência. No entanto, os valores médios finais reportados foram distintos para um mesmo material genético estudado. Observa-se variação proporcional média entre os valores obtidos pelas diferentes metodologias de 4,1%, o que equivale a uma diferença média de 0,020 g/cm³. Essa diferença pode ser explicada pelo fato de terem sido utilizadas amostras de madeira em formatos diferentes para a aplicação das metodologias aplicadas, como também amostragens distintas.

Para o Método da Balança Hidrostática, foram utilizados discos em diferentes posições ao longo do eixo longitudinal, que foram subdivididos em cunhas. Para a realização dessa análise, cunhas opostas e sem defeitos, na medida do possível, foram selecionadas. Dessa forma, o resultado obtido para a densidade básica ponderada leva em consideração a variação tanto no eixo longitudinal, como no eixo radial, uma vez que a determinação da densidade básica da cunha considera a proporção de madeira presente, correspondente à altura analisada.

Ao se utilizar discos, é provável que defeitos presentes na madeira, como nós e desvios de grã, acabem passando despercebidos e influenciem no resultado obtido. Por isso, é importante que a seleção das cunhas seja feita de forma a excluir os possíveis defeitos da madeira. No entanto, a presença de nós em madeiras de eucalipto é comum, tendo em vista que os tratos silviculturais que poderiam reduzir a quantidade de nós nas madeiras são custosos e aplicados com menos frequência do que o recomendado para reduzir esses defeitos. Nos discos analisados de todos os

materiais genéticos aqui estudados, foram observados nós, que foram devidamente removidos das cunhas previamente à execução das análises.

Já para o Método do Máximo Teor de Umidade, foram utilizadas amostras compostas de cavacos, obtidas a partir dos toretes cortados em diferentes posições ao longo do tronco das árvores. Os cavacos passaram por classificação, possibilitando a utilização de amostras homogêneas em espessura, sem nós e cascas. Dessa forma, as amostras utilizadas para a execução dessa análise foram mais homogêneas, gerando resultados mais uniformes, com menores desvios padrões, se comparado aos resultados obtidos pelo Método da Balança Hidrostática. A escolha da metodologia para determinação da densidade básica da madeira pode estar condicionada ao material disponível para essa análise. Em indústrias de celulose e papel, o acesso à amostras de cavacos é maior, o que torna o Método do Máximo Teor de Umidade mais usual para determinação da densidade básica da madeira pelas indústrias.

Para melhor visualizar a relação entre os resultados obtidos pelas duas metodologias empregadas nesse estudo, é apresentado na Figura 7 gráfico de correlação entre as densidades básicas dos discos e dos cavacos, bem como o modelo matemático ajustado.

Figura 7. Relação entre as densidades básicas das madeiras pelo Método do Máximo Teor de Umidade (densidade básica dos cavacos) e pelo Método da Balança Hidrostática (densidade básica dos discos).
*Significativo a 95% de probabilidade ($p < 0,05$).

A partir da relação apresentada Figura 7, é possível observar correlação positiva entre os resultados obtidos de densidade básica por ambas metodologias aplicadas. O mesmo comportamento gráfico foi observado em estudos desenvolvidos por Foelkel *et al* (1971) e Segura (2015), nos quais as análises comparativas entre as duas metodologias em questão conduziram a

resultados estatisticamente equivalentes. Dessa forma, a escolha da metodologia a ser aplicada para determinação da densidade básica depende da disponibilidade dos equipamentos necessários, tempo, formato da amostra de madeira disponível e objetivo final da determinação deste parâmetro (COELHO, 2017).

A ampla utilização da densidade básica dos cavacos como um dos principais parâmetros de qualidade da madeira para produção de polpa celulósica relaciona-se à sua relativa facilidade de determinação, correlação com parâmetros de eficiência do processo de polpação, como por exemplo o cálculo do consumo específico de madeira para produção de polpa celulósica. Além disso, a densidade básica permite a conversão de unidade volumétricas da madeira em gravimétricas, uma vez que as atividades e operações florestais normalmente são parametrizadas em base volumétrica de madeira (metro cúbico e estéreo), enquanto a quantificação da produção de polpa celulósica é realizada em base gravimétrica (tonelada).

A determinação da densidade básica dos cavacos pelo Método do Máximo Teor de Umidade requer atenção ao cumprimento de duas premissas básicas: 1) a densidade da “substância madeira” próxima a 1,530 g/cm³; 2) a madeira precisa estar no seu máximo teor de umidade para a pesagem do material saturado (FOELKEL, MILANEZ e BUSNARDO, 1983). Atentando-se especialmente à última premissa apresentada, foram calculados os teores de umidade base seca para as madeiras analisadas. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 8.

Figura 8. Teor de umidade base seca para os materiais genéticos analisados – U x T: *E. urophylla* x *E. tereticornis*; G x U: *E. grandis* x *E. urophylla*; U x G: *E. urophylla* x *E. grandis*; Ur: *E. urophylla*; HGr: *E. grandis* (híbrido); Gr: *E. grandis*.

Uma amostra reduzida de madeira, como cavacos, atinge o seu máximo teor de umidade ao ser saturada em água por tempo suficiente. O tempo de saturação é variável, dependendo da espécie de madeira analisada, bem como da sua porosidade, do seu teor de umidade inicial, da pressão, vácuo e temperatura as quais a amostra se encontra. Neste trabalho, as amostras de cavacos foram saturadas em água por 15 dias, tendo sido feitas pesagens diárias até a estabilização da massa úmida. Dessa maneira, verificada a estabilização da massa úmida das amostras de madeiras analisadas entre duas pesagens consecutivas, pode-se inferir que todos os materiais analisados atingiram o seu máximo teor de umidade.

4.2. Espessura dos cavacos

Para os processos químicos de polpação, a análise das dimensões dos cavacos, em especial a espessura, é fundamental para a melhor compreensão dos processos que envolvem a impregnação do licor de cozimento para o interior da madeira. Na Tabela 11 são apresentados os resultados médios referentes às espessuras dos cavacos utilizados neste trabalho, reportados conforme o material genético e a densidade básica dos cavacos.

Tabela 11. Valores médios de espessura dos cavacos.

Material genético	Densidade básica (g/cm ³)	Espessura (mm)
<i>E. urophylla</i> x <i>E. tereticornis</i>	0,610	4,23 1,1 (26,9%)
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	0,513	4,50 1,1 (24,0%)
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	0,487	4,25 1,0 (23,0%)
<i>E. urophylla</i>	0,465	4,65 1,2 (25,0%)
<i>E. grandis</i> (híbrido)	0,445	4,84 1,2 (24,0%)
<i>E. grandis</i>	0,416	4,26 1,0 (24,4%)
Média geral		4,45

Os valores nas células representam respectivamente: média, desvio padrão e coeficiente de variação (entre parênteses).

A primeira etapa dos processos químicos de polpação consiste na impregnação do licor de cozimento para o interior da madeira, que é facilitada pelo aumento da área de contato dos reagentes químicos com a madeira devido à sua redução em pedaços menores, como os cavacos. Assim, o tamanho e a qualidade dos cavacos influenciam diretamente na homogeneidade de deslignificação dos mesmos e, conseqüentemente, nas características das polpas celulósicas produzidas. Dois fenômenos principais ocorrem no processo de impregnação dos cavacos pelo licor de cozimento: penetração e difusão.

A penetração ocorre principalmente no sentido do comprimento do cavaco, promovida por diferenças de gradiente de pressão. Já a difusão, inicia-se quando a penetração cessa, promovida por diferença de concentração dos íons do licor de cozimento e ocorre em todas as direções do cavaco. Para que a difusão se inicie, o cavaco tem que estar previamente preenchido por líquido. A menor dimensão do cavaco facilita a entrada do licor de cozimento por meio da difusão, ou seja, a espessura do cavaco torna-se a dimensão preferencial para a etapa de impregnação (ANDRADE *et al.*, 1978; GRACE *et al.*, 1989; GULLICHSEN *et al.*, 1992; SILVA JÚNIOR, 2005; DANG e NGUYEN, 2008). Pelos motivos apresentados, optou-se neste estudo por analisar apenas a dimensão em espessura dos cavacos.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 11, observa-se que as espessuras médias dos cavacos foram próximas entre si, com menor valor médio observado de 4,23 mm para o material com a maior densidade básica ($0,610 \text{ g/cm}^3$) e o maior valor médio para a madeira com densidade básica de $0,445 \text{ g/cm}^3$, equivalente a 4,84 mm. Esses valores indicam que a classificação dos cavacos conduzida resultou em espessuras dentro da faixa adotada pelas empresas de celulose e papel, que pode variar entre 2 e 8 mm (ANDRADE *et al.*, 1978; MacLeod, 2007; FOELKEL, 2009).

Na Figura 9 são apresentados os gráficos de distribuição em classes de espessura.

Figura 9. Distribuição por classes de espessura de acordo com a densidade básica – U x T: *E. urophylla* x *E. tereticornis*; G x U: *E. grandis* x *E. urophylla*; U x G: *E. urophylla* x *E. grandis*; Ur: *E. urophylla*; HGGr: *E. grandis* (híbrido); Gr: *E. grandis*.

Observa-se na Figura 9 grande amplitude de distribuição de classes de espessura para todos os materiais analisados, variando entre 1,51 a 8,51 mm. Apesar disso, os cavacos avaliados para os seis materiais genéticos apresentaram maiores frequências relativas entre as classes de 4,01 a 5,51 mm, com espessura média geral de 4,45 mm, valor dentro da faixa considerada para cavacos de qualidade. Observa-se graficamente tendência de distribuição normal das classes de espessura, o que indica que as maiores frequências relativas se encontram próximas à média.

Em alguns estudos, são relatadas dificuldades em se obter cavacos com boa qualidade utilizando-se madeiras mais densas, principalmente em espessura, tendo sido indicada que a espessura do cavaco seria inversamente proporcional à densidade básica da madeira (TWADDLE, 1997; FOELKEL, 2009). No entanto, atualmente é possível realizar ajustes no picador industrial, como angulação e afiação de facas, que minimizam os efeitos diretos da densidade básica durante o processo de picagem.

Em estudo realizado por Samistraro *et al.* (2015), não foi observada dificuldade de picagem para a madeira *Eucalyptus benthamii*, que apresentou o maior valor de densidade básica entre os materiais estudados (0,523 g/cm³). Ainda de acordo os mesmos autores, os resultados obtidos na classificação dos cavacos foram similares entre as espécies com diferentes densidades básicas e as variações observadas nos processos de polpação não se relacionaram com a qualidade dos cavacos utilizados.

Uma demanda comum para a indústria de celulose e papel é a mínima variação possível nas dimensões dos cavacos, em particular em espessura. Para além disso, uma melhor distribuição das dimensões dos cavacos proporciona produção de polpa celulósica com melhor qualidade, devido a uniformidade no processo de impregnação. Na prática, significa dizer que é preferível se

produzir cavacos com distribuição de espessuras mais próximas do que em um valor específico (HELLSTRÖM, 2010).

Na Figura 10 são apresentadas as porcentagens obtidas por classe de espessura para cada material genético analisado, de acordo com as respectivas densidades básicas. Para melhor visualização dos resultados, optou-se por agrupar as classes de espessuras duas a duas.

Figura 10. Distribuição percentual por classes de espessura conforme a densidade básica – U x T: *E. urophylla* x *E. tereticornis*; G x U: *E. grandis* x *E. urophylla*; U x G: *E. urophylla* x *E. grandis*; Ur: *E. urophylla*; HGr: *E. grandis* (híbrido); Gr: *E. grandis*.

Lombardo e Padilla (1998) relataram que para que ocorra uma penetração rápida e uniforme do licor, 60% dos cavacos em uso precisam apresentar espessura entre 2 e 5 mm. Para todos os materiais genéticos avaliados neste estudo, as espessuras dos cavacos apresentaram frequência superior à faixa de espessura mencionada.

Considerando a análise da espessura dos cavacos, as prováveis variações nos processos de polpação realizados dificilmente estarão relacionadas aos mesmos, pois os cavacos dos diferentes materiais genéticos avaliados apresentaram espessuras semelhantes entre si. O uso de cavacos uniformes no interior do digestor promove uma impregnação do licor de cozimento de forma mais homogênea e, conseqüentemente, a deslignificação da madeira ocorre uniformemente em todo o material utilizado. Destaca-se que os cavacos utilizados nesse estudo foram confeccionados no mesmo local, utilizando-se picador semi-industrial, com manutenções regulares das facas e selecionados de forma minuciosa, o que garantiu tamanha qualidade na uniformidade em espessura observada.

4.3. Composição química da madeira

A análise da composição química da madeira auxilia na compreensão do comportamento da madeira frente aos processos químicos de polpação. Os componentes químicos presentes na madeira podem interferir no consumo de reagentes durante o processo de polpação, como também no rendimento de processo, qualidade da polpa celulósica produzida, entre outros. Os teores médios percentuais dos componentes químicos das madeiras analisadas são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Valores médios para composição química da madeira.

Material genético	Densidade básica (g/cm ³)	Teor de extrativos totais %	Teor de lignina			Teor de holocelulose %	Teor de cinzas %
			Klason %	Solúvel %	Total %		
U x T	0,610	4,45 a 0,4 (8,1%)	26,37 0,4 (1,5%)	3,64 0,2 (6,6%)	30,01 abc 0,4 (1,3%)	65,54 c 0,4 (0,6%)	0,27 b 0,0 (9,1%)
G x U	0,513	2,32 b 0,3 (11,7%)	27,33 0,7 (2,6%)	3,29 0,1 (3,3%)	30,63 a 0,7 (2,2%)	67,05 b 0,8 (1,1%)	0,25 b 0,0 (11,6%)
U x G	0,487	3,73 a 0,2 (5,9%)	24,86 0,8 (3,4%)	3,90 0,2 (5,1%)	28,76 c 0,7 (2,3%)	67,52 b 0,6 (0,9%)	0,24 b 0,1 (31,6%)
Ur	0,465	3,68 a 0,2 (4,3%)	25,49 0,2 (0,8%)	3,94 0,1 (2,7%)	29,44 bc 0,2 (0,5%)	66,88 bc 0,2 (0,3%)	0,50 a 0,0 (4,5%)
HGr	0,445	2,59 b 0,42 (16,9%)	27,36 0,5 (1,8%)	3,59 0,1 (3,8%)	30,96 a 0,5 (1,5%)	66,45 bc 0,5 (0,7%)	0,47 a 0,0 (6,0%)
Gr	0,416	1,46 c 0,2 (13,7%)	25,72 0,3 (1,1%)	3,45 0,1 (2,1%)	29,17 c 0,2 (0,8%)	69,37 a 0,4 (0,6%)	0,21 b 0,0 (9,9%)

Os valores nas células representam respectivamente: média, desvio padrão e coeficiente de variação (entre parênteses). As médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey ($\alpha=0,05$). U x T: *E. urophylla* x *E. tereticornis*; G x U: *E. grandis* x *E. urophylla*; U x G: *E. urophylla* x *E. grandis*; Ur: *E. urophylla*; HGr: *E. grandis* (híbrido); Gr: *E. grandis*.

Os teores de extrativos, apesar de serem baixos quando comparados aos demais componentes químicos presentes na madeira, podem influenciar negativamente nos processos de polpação químicos. Altos teores deste componente são indesejáveis pois podem representar maior consumo dos reagentes químicos durante a deslignificação, formar incrustações em diversos equipamentos, dificultar a etapa de branqueamento da polpa celulósica, como também gerar manchas nos papéis produzidos, denominadas como *pitchs* (FENGEL; WEGENER, 1984; MIMMS *et al.*, 1993).

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 12, as madeiras analisadas neste estudo apresentaram considerável variabilidade nos teores de extrativos totais, entre 1,46% e 4,45%, referentes às madeiras de *E. grandis* (Gr) e *E. urophylla* x *E. tereticornis* (U x T), materiais que

apresentaram as densidades básicas extremas (0,416 e 0,610 g/cm³). A análise estatística corroborou com o demonstrado anteriormente, em que se observa diferença estatística significativa entre esses materiais.

Os teores de extrativos observados para as madeiras de *E. grandis* x *E. urophylla* (G x U), *E. urophylla* x *E. grandis* (U x G) e *E. grandis* (Gr) encontram-se consoantes com os obtidos em estudos que utilizaram a mesma metodologia de extração aplicada neste estudo para quantificação de extrativos (BASSA, 2002; ALMEIDA, 2003; DUARTE, 2006; SEGURA, 2012; SARTO; SEGURA; SILVA JÚNIOR, 2015; VIVIAN, 2015). Para os demais materiais genéticos, não foram encontrados estudos que utilizassem a mesma metodologia para determinação dos teores de extrativos.

As variações observadas nos teores de extrativos das madeiras estudadas podem ser resultantes de diferentes fatores, entre os quais se destacam fatores genéticos, idade, sítio de plantio, características climáticas, como também época de colheita, forma de transporte, armazenamento e tempo de estocagem da madeira (SILVÉRIO *et al.*, 2008; SOARES *et al.*, 2015; MORAIS *et al.*, 2017).

Destaca-se que as madeiras analisadas neste estudo foram coletadas em diferentes sítios e submetidas a condições meteorológicas distintas de pluviosidade e temperatura (Apêndice A), além de terem diferentes idades e materiais genéticos. Dessa forma, a variação do teor de extrativos observada pode estar correlacionada a este conjunto de fatores, tendo em vista que as propriedades da madeira são resultantes da interação entre o potencial genético de dada espécie com as condições ambientais em que se desenvolve. A interação material genético e sítio de plantio foi demonstrada em estudos desenvolvidos por Gouvea *et al.* (2012) e Freitas *et al.* (2018), nos quais foram observadas influências do sítio de plantio no teor de extrativos em madeiras de *Eucalyptus*.

Algumas estratégias vêm sendo desenvolvidas por pesquisadores e adotadas pelas indústrias produtoras de polpa celulósica branqueada de eucalipto visando a redução da formação de *pitch* nos papéis como, por exemplo, a seleção de materiais genéticos que apresentem baixos teores de extrativos, escolha da época de colheita da madeira, armazenamento da madeira por período mais longo após a colheita, entre outros (GOMIDE *et al.*, 2005; SILVÉRIO *et al.*, 2008; MORAIS *et al.*, 2017).

Assim como os teores de extrativos, altos teores de lignina são também considerados indesejáveis aos processos de polpação. Segura (2015) ressalta que quanto menor os teores desse componente, melhor é a deslignificação da madeira, permitindo que as condições de cozimento sejam mais brandas e resultando em polpas celulósicas de melhor qualidade, como também em maior rendimento de processo.

O teor de lignina total, correspondente ao somatório das ligninas Klason e solúvel, variou entre 28,76% e 30,96% referentes às madeiras do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* (U x G) e do híbrido de *E. grandis* (HGr), como demonstrado na Tabela 12. O teste de médias aplicado demonstrou haver diferença estatística significativa entre as médias obtidas, com destaque para as madeiras com teores de lignina máximo e mínimo.

Segundo Gomide e Colodette (2007), madeiras de folhosas que apresentam teores de lignina acima de 30% são consideradas madeiras com elevados teores desse componente, como observado para as madeiras de *E. urophylla* x *E. tereticornis* (U x T), *E. grandis* x *E. urophylla* (G x U) e do híbrido de *E. grandis* (HGr). Apesar dos elevados teores de lignina total observados, os resultados obtidos neste estudo encontram-se dentro da faixa de teor de lignina para as madeiras de folhosas de zona tropical, que pode variar de 26 a 35% (SIXTA, 2008).

Além da quantificação do teor de lignina, outro parâmetro interessante para a análise da qualidade da madeira para produção de polpa celulósica é a quantificação das unidades monoméricas da lignina, formada nas madeiras de folhosas pelas unidades siringila e guaiacila. Para isso, a relação siringila/guaiacila (S/G) é usualmente estabelecida para quantificar essas unidades presentes na madeira (OUDIA, *et al.*, 2007).

Na Figura 11 são apresentados os valores médios obtidos da relação siringila/guaiacila para as madeiras analisadas neste estudo.

Figura 11. Relação siringila/guaiacila das madeiras analisadas expressas de acordo com a densidade básica. U x T: *E. urophylla* x *E. tereticornis*; G x U: *E. grandis* x *E. urophylla*; U x G: *E. urophylla* x *E. grandis*; Ur: *E. urophylla*; HGr: *E. grandis* (híbrido); Gr: *E. grandis*.

Durante o processo de polpação, as estruturas de lignina siringil são preferencialmente atacadas. A lignina guaiacil, por sua vez, possui grau de condensação mais alto devido ao carbono aromático na posição C-5 disponível para realizar ligação carbono-carbono muito forte durante a etapa de polimerização da biossíntese da lignina e, conseqüentemente, apresenta maior resistência à deslignificação em comparação à lignina do tipo siringil (GOMIDE *et al.*, 2005; GUTIÉRREZ *et al.*, 2006; OUDIA, 2007). Dessa maneira, acredita-se que madeiras com relação siringila/guaiacila mais alta apresentem maior facilidade de deslignificação.

Observa-se na Figura 11 que a relação siringila/guaiacila variou de 2,5 a 3,3 para os materiais de *E. grandis* (Gr) e *E. urophylla* (Ur). Na literatura especializada é relatada que a relação siringila/guaiacila da lignina pode variar entre 0,51 a 5,2 a depender da espécie de madeira estudada (WALLIS; WEARNE; WRIGHT, 1996; CARVALHO, 2002).

Em estudos realizados por Mosca (2010) e Ferreira *et al.* (2006) com madeiras do híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* e *E. urophylla* x *E. grandis* foram obtidas relação S/G variando entre 2,4 e 2,6. Para o material U x G analisado, a relação S/G obtida foi superior ao estudo citado anteriormente, com valor de 3,1 (Figura 11). Já para a madeira de *E. urophylla* (Ur) obteve-se relação de 3,3, valor superior ao obtido em estudo desenvolvido por Mokfienski (2004), que relatou relação entre 2,2 e 2,6 para essa madeira. Para as madeiras de *E. grandis* (Gr) e do híbrido (HGr) analisadas neste estudo, foram observadas relações S/G de 2,5 e 2,6, respectivamente, valores condizentes ao encontrado por Gomide *et al.* (2005), que relataram valores variando entre 2,0 e 2,5 para essas madeiras.

O teor de carboidratos totais da madeira foi expresso neste estudo como teor de holocelulose (Tabela 12), que pode ser interpretado como o somatório dos teores de celulose e hemiceluloses da madeira. O teor de holocelulose afeta positivamente o rendimento do processo de polpação, sendo preferível o uso de madeiras que apresentem maiores valores desse componente. Neste estudo, os teores médios de holocelulose variaram entre 65,54 a 69,37% referentes às madeiras do híbrido de *E. urophylla* x *E. tereticornis* (U x T) e de *E. grandis* (Gr). Estes resultados estão consoantes com os obtidos em estudo que avaliou as características de dez clones distintos de eucalipto plantados no Brasil, em que foi observada variação do teor de holocelulose entre 64,5 e 70,2% (GOMIDE *et al.*, 2005).

Como análise complementar ao teor de holocelulose, foram quantificadas as frações de carboidratos presentes nas madeiras estudadas. Os percentuais médios da constituição polissacarídica das madeiras são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Constituição percentual polissacarídica das madeiras.

Material genético	Carboidratos da madeira %					Teor de celulose (%)
	Glicanas	Xilanas	Galactanas	Mananas	Arabinanas	
U x T	45,95	10,05	1,20	0,70	0,20	45,25
G x U	46,40	10,85	0,80	1,10	0,20	45,30
U x G	45,95	11,50	0,50	0,80	0,15	45,15
Ur	43,30	12,30	1,40	0,60	0,30	42,70
HGr	47,80	10,85	0,90	0,60	0,20	47,20
Gr	48,15	10,45	0,60	0,60	0,15	47,55

U x T: *E. urophylla* x *E. tereticornis*; G x U: *E. grandis* x *E. urophylla*; U x G: *E. urophylla* x *E. grandis*; Ur: *E. urophylla*; HGr: *E. grandis* (híbrido); Gr: *E. grandis*.

As glicanas são consideradas os carboidratos mais resistentes à degradação alcalina, sendo preferível o uso de madeiras que apresentem maiores frações desse componente para os processos químicos de polpação (SANTOS, 2008). Esse carboidrato é o único açúcar presente na fração de celulose das madeiras e, para o cálculo dos teores de celulose apresentados na Tabela 13, foram utilizadas as frações totais de glicanas, descontado o teor de glicose associado à glicomananas (mananas). Entre as madeiras analisadas neste estudo, o *E. grandis* (Gr) apresentou maior teor de celulose, correspondente a 47,55%, enquanto a madeira de *E. urophylla* (Ur) resultou em menor valor deste componente, equivalente a 43,30%.

As xilanas são a fração dominante das hemiceluloses nas madeiras de eucalipto, facilmente removíveis na presença de álcali. Para as madeiras analisadas neste estudo, os valores médios percentuais obtidos para esse elemento variaram entre 10,05 e 12,30% para as madeiras do híbrido de *E. urophylla* x *E. tereticornis* (U x T) e de *E. urophylla* (Ur). Estes valores são semelhantes aos encontrados para madeiras de eucalipto analisadas por Gomide *et al.* (2005), que variaram entre 10,8 a 13,2%.

As demais hemiceluloses, representadas pelas galactanas, mananas e arabinanas apresentaram média geral inferior a 1% do peso total das madeiras analisadas, valores típicos para as madeiras de eucalipto brasileiras e considerados pouco significativos (ALVES *et al.*, 2011). As arabinanas foram as que apresentaram a menor fração percentual, com média geral de 0,20%.

Bem como para os teores de extrativos e de lignina, é preferível o uso de madeiras com o menor teor de cinzas possível, tendo em vista que esses componentes inorgânicos afetam negativamente alguns aspectos do processo de polpação, como consumo de álcali, recuperação do licor negro, entre outros. Em relação ao teor de cinzas obtido para as madeiras estudadas (Tabela 12), foi observada variação de 0,21% a 0,50%, respectivamente para *E. grandis* (Gr) e *E. urophylla* (Ur). Os resultados obtidos neste estudo para o teor de cinzas encontram-se dentro da faixa

considerada para madeiras de *Eucalyptus*, tendo em vista que para madeiras deste gênero raramente se observam valores deste componente acima de 1% (TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996).

As madeiras utilizadas neste estudo foram selecionadas de materiais genéticos, procedências, locais de plantio e idades variadas, com o intuito de se obter madeiras que apresentassem densidades básicas mais distintas possível. Considerando-se essas ressalvas, foram analisadas as possíveis associações existentes entre as densidades básicas das madeiras e as características químicas das madeiras estudadas, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14. Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os parâmetros analisados.

Parâmetros	Densidade básica
Extrativos totais	0,71*
Holocelulose	-0,70*
Lignina total	0,16 ^{ns}
Cinzas	-0,03 ^{ns}
Glicanas	-0,28 ^{ns}
Xilanas	-0,38 ^{ns}
Galactanas	0,38 ^{ns}
Mananas	0,35 ^{ns}
Arabinanas	0,06 ^{ns}
Teor de celulose	-0,32 ^{ns}
Relação S/G	0,22 ^{ns}

*Significativo a 95% de probabilidade ($p < 0,05$), pelo teste t; ns: não significativo a 95% de probabilidade ($p > 0,05$), pelo teste t.

De acordo com a Tabela 14, observa-se que a maioria das análises de correlações realizadas não apresentou significância a nível de probabilidade de 95% (ns), demonstrando que, para as madeiras analisadas neste estudo, os parâmetros em questão não estão associados entre si. A correlação obtida entre teor de extrativos totais e densidade básica das madeiras estudadas foi positiva e significativa, com coeficiente de correlação de Pearson (r) equivalente a 0,71. Observou-se também correlação significativa, porém negativa, entre os parâmetros de holocelulose e densidade básica da madeira, resultante de correlação de Pearson (r) de -0,70.

Considerando a caracterização química das madeiras estudadas, pode-se inferir que a madeira menos densa, correspondente ao *E. grandis* (Gr), apresentou as melhores características químicas para os processos de polpação, se considerado o maior teor de holocelulose (69,37%) e os menores teores de extrativos e cinzas, respectivamente equivalentes a 1,46 e 0,21%. Já o híbrido de *E. urophylla* x *E. tereticornis* (U x T), correspondente à madeira mais densa, foi caracterizado com o maior teor de extrativos (4,45%) e menor teor de holocelulose (65,54%), características químicas

que podem ser desfavoráveis frente ao processo de polpação. Destaca-se o híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla* (G x U), madeira caracterizada como a segunda mais densa (0,513 g/cm³), e que apresentou características químicas favoráveis aos processos de polpação, como baixo teor de extrativos totais (2,32%) e alto teor de holocelulose (67,05%), se comparado aos demais materiais genéticos avaliados.

4.4. Dimensões das fibras

A análise das dimensões das fibras consiste na mensuração do comprimento, largura, espessura de parede e diâmetro do lume e pode indicar o potencial de dada matéria-prima fibrosa para a fabricação de polpa celulósica e papel. As dimensões das fibras podem influenciar na formação, densidade e porosidade das madeiras, como também dar indicativos acerca das propriedades físico-mecânicas e óticas do papel a ser produzido.

Na Tabela 15 são apresentados os resultados médios referentes às dimensões das fibras das madeiras analisadas.

Tabela 15. Valores médios das dimensões das fibras.

Material genético	Densidade básica (g/cm ³)	C (mm)	L (μm)	DL (μm)	EP (μm)
U x T	0,610	0,97 bc 0,1 (11,5%)	17,11 c 2,3 (13,5%)	6,76 d 1,3 (18,8%)	5,18 a 1,0 (18,9%)
G x U	0,513	0,95 c 0,1 (14,3%)	17,74 bc 3,1 (17,5%)	9,19 c 2,1 (22,4%)	4,28 b 1,0 (22,8%)
U x G	0,487	0,89 d 0,1 (14,4%)	18,79 b 2,8 (14,9%)	11,38 b 2,2 (18,9%)	3,71 cd 0,6 (17,0%)
Ur	0,465	1,05 a 0,1 (12,9%)	17,62 bc 4,4 (24,8%)	10,66 b 2,9 (27,1%)	3,48 d 1,2 (35,0%)
HGr	0,445	1,01 ab 0,1 (13,4%)	20,63 a 3,6 (17,6%)	12,88 a 3,3 (25,3%)	3,87 c 0,6 (16,2%)
Gr	0,416	1,05 a 0,2 (14,1%)	20,76 a 3,3 (16,1%)	12,91 a 2,8 (16,1%)	3,93 bc 0,9 (22,4%)

C: comprimento das fibras; **L:** largura das fibras; **DL:** diâmetro do lume; **EP:** espessura de parede; Os valores nas células representam respectivamente: média, desvio padrão e coeficiente de variação (entre parênteses). As médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey ($\alpha=0,05$). U x T: *E. urophylla* x *E. tereticornis*; G x U: *E. grandis* x *E. urophylla*; U x G: *E. urophylla* x *E. grandis*; Ur: *E. urophylla*; HGr: *E. grandis* (híbrido); Gr: *E. grandis*.

As dimensões das fibras obtidas nesse estudo encontram-se consoantes com os valores esperados para as madeiras de eucalipto. Segundo Barrichelo e Brito (1976), o comprimento médio das fibras para as madeiras de eucalipto varia aproximadamente entre 0,75 e 1,30 mm; para a largura das fibras, foram reportados valores entre 12 a 20 μm e para a espessura da parede, valores de 2,5 a 6,0 μm .

O principal objetivo dos processos de polpação é a individualização das fibras das madeiras, possibilitando o posterior entrelaçamento das mesmas para a formação do papel. Algumas características do papel, como resistência mecânica, relacionam-se mais fortemente à matéria-prima utilizada do que necessariamente ao processo de polpação aplicado. Entre as dimensões das fibras mensuradas, o comprimento, diâmetro de lume e a espessura da parede são as mais relevantes para produção de papel, sendo as duas últimas dimensões transversais mais significativas para madeiras de fibra curta destinadas à produção de celulose e papel.

Para as madeiras estudadas, o comprimento das fibras variou entre 0,89 mm e 1,05 mm (Tabela 15). Apesar de essas médias terem sido distintas estatisticamente, pode-se dizer que todos os materiais estudados são classificados como fibras curtas. As madeiras do gênero *Eucalyptus* são assim classificadas por possuírem comprimento de fibra entre 0,5 e 1,5 mm, enquanto as madeiras do gênero *Pinus* são classificadas como fibras longas por apresentarem comprimento dos traqueídes entre 3 e 6 mm (BASSA, 2006). Dessa forma, a variação observada nos comprimentos das fibras dos materiais genéticos analisados neste estudo não representam impacto significativo nas propriedades físico mecânicas das polpas celulósicas produzidas.

As fibras curtas são preferencialmente utilizadas para produção de papéis que demandam alto volume específico e opacidade. Os principais tipos de papéis produzidos a partir dessa matéria-prima são do tipo *tissue* (sanitários), para impressão e escrita, cartões multicamadas, filtros industriais, papéis para impregnação e revestimento, entre outros. A mistura de polpas de fibras curtas e longas é uma estratégia utilizada quando se busca incrementar as propriedades físico-mecânicas do papel produzido, em especial na melhoria da resistência ao rasgo, característica conferido aos materiais que apresentam maiores comprimentos de fibra.

Para a largura das fibras (Tabela 15) observou-se valor mínimo de 17,11 μm para a madeira mais densa (0,610 g/cm³) e valor máximo de 20,76 μm , correspondente à madeira menos densa (0,416 g/cm³). A mesma tendência foi observada para o diâmetro do lume, em que a menor média foi obtida para a madeira com maior densidade básica (6,76 μm) e a maior média para o material com menor densidade básica (12,91 μm).

Para melhor visualizar a relação entre densidade básica da madeira e as dimensões de largura e diâmetro do lume, são apresentados na Figura 12 gráficos de dispersão entre esses parâmetros.

Figura 12. A: Relação entre densidade básica da madeira e largura da fibra e B: relação entre densidade básica e diâmetro do lume. *Significativo a 95% de probabilidade ($p < 0,05$).

As dimensões de largura e diâmetro do lume das fibras analisadas neste trabalho apresentaram correlações negativas e significativas com o parâmetro de densidade básica, conforme observado na Figura 12. Os coeficientes de correlação de Pearson (r) para as dimensões citadas com relação à densidade básica foram de -0,31 e -0,62, respectivamente para largura e diâmetro do lume. A mesma tendência foi observada em estudo desenvolvido por Mokfienski *et al.* (2004) utilizando-se dez madeiras de eucalipto com densidades básicas variadas.

Ainda de acordo com a Tabela 15, os valores observados para as espessuras das paredes variaram de 3,48 a 5,18 μm , correspondentes às madeiras de *E. urophylla* (Ur) e ao híbrido de *E. urophylla* x *E. tereticornis* (U x T). Dinus e Welt (1997) destacam que a densidade básica depende da espessura da parede da fibra, entre outras características. Nota-se pelos resultados apresentados que as madeiras mais densas apresentaram maiores espessuras de paredes celulares.

Nas fibras e traqueídes, a espessura da parede e o diâmetro do lume são dimensões que estão relacionadas à porosidade da madeira. Para os processos de polpação, a porosidade do material é uma característica importante pois relaciona-se com os espaços disponíveis no interior da madeira, característica que facilita o acesso do licor de cozimento ao interior da madeira e que pode promover uma melhor deslignificação. Na Figura 13 são apresentados os resultados de porosidade da madeira.

Figura 13. Porosidade das madeiras expressas conforme o código e a densidade básica.

As madeiras mais densas possuem maior quantidade de “substância madeira” por unidade de volume, caracterizadas pelas maiores espessuras de parede e menores diâmetro do lume, ou seja, apresentam menos espaços vazios se comparadas às madeiras menos densas. Tal fato é corroborado pelos resultados de porosidade da madeira apresentados na Figura 13, em que é verificada a diminuição dos valores médios conforme o aumento da densidade básica. Essa tendência é esperada tendo em vista a correlação significativa e negativa observada entre as densidades básicas das madeiras estudadas com as porosidades calculadas ($r=-0,99$).

Analisando-se os materiais genéticos que apresentaram as densidades básicas extremas, observa-se que a porosidade da madeira mais densa (U x T) é 21,1% inferior em relação à madeira menos densa (Gr). Essa diferença de porosidade impacta no volume de espaço disponível para ser ocupado pelos reagentes químicos, sendo menor, portanto, para as madeiras mais densas, o que pode afetar negativamente no consumo de reagentes e geração de rejeitos, por exemplo. Ressalta-se também que as madeiras mais densas apresentam a tendência de serem mais impermeáveis, ou seja, apresentam maior dificuldade de impregnação por determinado líquido ou gás, tendo em vista que apresentam paredes celulares mais espessas, o que significa maior diferencial de pressão para ocorrer a entrada de líquidos para o seu interior.

As relações entre as dimensões das fibras resultam em coeficientes e índices amplamente utilizados para a caracterização das fibras de determinada espécie visando a sua adequação para fabricação de papel. Esses índices são preferíveis à análise das dimensões das fibras de forma isolada, considerando que podem dar indicativos mais consistentes no que tange às características físico-mecânicas da polpa celulósica e do papel produzidos a partir de dada matéria-prima

(MENEGAZZO, 2012; THOMAZ, 2019; TALGATTI *et al.*, 2020). Na Tabela 16 são apresentados os resultados dessas relações para cada material genético.

Tabela 16. Relações entre as dimensões das fibras.

Material genético	Densidade básica (g/cm ³)	Fração parede (%)	Coefficiente de flexibilidade (%)	Índice de Runkel
U x T	0,610	60	39	1,533
G x U	0,513	48	52	0,930
U x G	0,487	40	61	0,651
Ur	0,465	39	60	0,653
HGr	0,445	38	62	0,601
Gr	0,416	38	62	0,608

U x T: *E. urophylla* x *E. tereticornis*; G x U: *E. grandis* x *E. urophylla*; U x G: *E. urophylla* x *E. grandis*; Ur: *E. urophylla*; HGr: *E. grandis* (híbrido); Gr: *E. grandis*.

Os resultados de fração parede obtidos neste estudo variaram entre 38 e 60%, respectivamente para os materiais genéticos com as densidades básicas extremas (Gr e U x T). Esse índice relaciona-se com a capacidade de colapso das fibras e, conseqüentemente, com a formação das ligações entre as fibras. As polpas celulósicas provenientes de fibras com fração parede alta tendem a apresentar maior volume específico ou *bulk*, maior resistência ao rasgo e menor resistência à passagem de ar, enquanto as fibras com menor fração parede tendem a apresentar elevada resistência à tração (SILVA JÚNIOR, 2005).

É admitido pelas indústrias que matérias-primas com fração parede superior a 40% podem resultar em polpas celulósicas com fibras mais rígidas e de difícil colapso, conseqüentemente convertendo-se em papéis de rede mais maleável, com menor ligação entre fibras, ou seja, em papéis mais porosos, volumosos, rugosos e absorventes (FOELKEL, 2007; BALDIN *et al.*, 2017). Considerando as madeiras estudadas, os materiais genéticos dos híbridos de *E. urophylla* x *E. tereticornis* (U x T) e de *E. grandis* x *E. urophylla* (G x U), caracterizadas como as mais densas (0,513 e 0,610 g/cm³), podem resultar em polpas celulósicas com as características citadas para as fibras com fração parede acima de 40%.

Observou-se para os materiais genéticos estudados que os resultados obtidos para fração parede apresentaram correlação positiva com a densidade básica ($r=0,73$). Entre as dimensões utilizadas para o cálculo da fração parede, a espessura da parede apresentou maior impacto ($r=0,73$) se comparada com a largura da fibra ($r=-0,27$). Na Figura 14 é apresentada a relação entre densidade básica da madeira e a fração parede dos materiais estudados.

Figura 14. Relação entre fração parede das fibras e densidade básica da madeira. *Significativo a 95% de probabilidade ($p < 0,05$).

Observa-se na Figura 14 correlações significativas e positivas entre densidade básica da madeira e fração parede. A mesma tendência foi constatada em estudos consultados na literatura, nos quais foram observados maiores valores de fração parede conforme o incremento em densidade básica da madeira (BASSA, 2002; MOKFIENSKI, 2004; SILVA JÚNIOR, 2005; ANTUNES, 2009; SEGURA, 2012, 2015; COELHO, 2017).

De maneira geral, papéis produzidos a partir de polpas celulósicas provenientes de madeiras mais densas, com maiores valores de fração parede, tendem a apresentar alto volume específico, estrutura de papel maleável devido a menor capacidade de ligação entre fibras, baixa flexibilidade, entre outros. Esse tipo de polpa celulósica é preferível para o uso em papéis do tipo *tissue* (sanitários) e filtro. Já as polpas celulósicas provenientes de madeiras menos densas são preferíveis para o uso em papéis que demandam maior resistência, melhor ligação entre fibras, alta população fibrosa, opacidade, como por exemplo os papéis para imprimir e escrever e papéis especiais.

O coeficiente de flexibilidade indica a facilidade de união entre as fibras. De acordo com Bektas *et al.*, (1999), as fibras são classificadas como flexíveis quando apresentam coeficiente de flexibilidade variando entre 50 e 75%. De acordo com os resultados apresentados na Tabela 16, à exceção da madeira mais densa (U x T), os demais materiais genéticos estudados apresentaram coeficiente de flexibilidade dentro da faixa citada. O maior valor obtido dessa relação foi de 62%, resultado observado para as duas madeiras menos densas (HGr e Gr), o que indica que as fibras

provenientes desses materiais genéticos podem apresentar maior facilidade de entrelaçamento, desejável para papéis que necessitam de maior resistência, como os para imprimir e escrever.

Assim como o parâmetro de fração parede, o Índice de Runkel está relacionado à firmeza da fibra, sendo que quanto maior o seu valor, mais rígida a fibra pode se tornar, podendo dificultar a formação do papel e afetar nas propriedades de resistência (GONÇALEZ *et al.*, 2014). Esse índice é dividido em cinco grupos, de acordo com a classificação desenvolvida por Runkel (1952), sendo: I – até 0,25 (material excelente para produção de papel); II – 0,25 a 0,50 (muito bom); III – 0,50 a 1,00 (bom); IV – 1,00 a 2,00 (regular) e V – acima de 2,00 (não deve ser utilizado para papel). Seguindo essa classificação, a madeira do híbrido de *E. urophylla* x *E. tereticornis* (U x T) resultaria em polpa celulósica regular para a produção de papel e os demais materiais genéticos, em polpas celulósicas boas para essa finalidade.

Considerando a caracterização das dimensões das fibras, é possível inferir que os materiais genéticos estudados resultarão em polpas celulósicas e papéis com características e qualidades distintas, em especial para a madeira mais densa (U x T). Salienta-se que os resultados obtidos da caracterização das madeiras quanto à densidade básica, composição química e dimensões das fibras dão indicativos do potencial desempenho dos diferentes materiais genéticos estudados frente aos processos de polpação aplicados e podem auxiliar na compreensão dos resultados relacionados aos processos de polpação.

4.5. Processos de polpação

Os processos de polpação realizados nesse trabalho foram denominados como convencional (C) e estendido (E). As condições de cozimento aplicadas para o processo de polpação convencional foram baseadas nos primeiros ensaios laboratoriais de qualidade de madeira desenvolvidos com madeiras de eucalipto no Brasil, nos quais se utilizavam de temperaturas máximas de cozimento entre 165°C e 175°C, com tempos totais de cozimento até 150 minutos (FOELKEL *et al.*, 1975; FOELKEL, 1976; FOELKEL, SANI, 1976; GONZAGA, 1983).

Os processos de polpação estendidos foram realizados como uma forma simplificada de simulação dos processos modificados de polpação (Lo-Solids® e Compact Cooking™), atualmente aplicados nas fábricas mais modernas de produção de polpa celulósica. As condições de cozimento utilizadas nos processos estendidos foram baseadas nesses processos modificados, nos quais se utilizam temperaturas máximas de cozimento mais brandas, entre 145 e 155 °C, com tempos totais de cozimentos mais longos.

Na Tabela 17 são apresentados os resultados referentes aos parâmetros dos processos de polpação, como também as análises das polpas celulósicas e dos licores negros.

Tabela 17. Valores médios dos resultados de polpação dos tipos convencional (C) e estendido (E).

Parâmetros	Tipo	U x T	G x U	U x G	Ur	HGr	Gr
		0,610	0,513	0,487	0,465	0,445	0,416
Análises das polpas celulósicas							
Número kappa	C ^{ns}	18,5	18,3	18,0	17,9	17,8	18,3
	E ^{ns}	18,4	18,6	18,5	18,2	18,1	18,6
Álcali efetivo residual (gNaOH/L)	C ^{ns}	5,3	6,4	5,4	7,2	5,5	5,0
	E ^{ns}	7,7	5,0	5,2	7,1	6,0	6,1
Álcali ativo (% NaOH)	C	21,0	19,5	21,0	24,0	19,0	18,0
	E	21,0	19,0	19,0	23,0	19,0	18,0
Temperatura máxima (°C)	C	170	169	170	170	165	168
	E	149	149	149	151	147	149
Fator H	C *	985	911	1005	1003	641	816
	E *	453	460	461	534	378	461
Rendimento bruto (%)	C *	47,4	51,7	49,1	44,7	52,7	53,1
	E *	50,1	54,4	52,4	48,8	54,6	55,2
Rendimento depurado (%)	C *	47,1	51,5	49,0	44,7	52,4	52,9
	E *	50,0	54,4	52,4	48,7	54,4	55,2
Teor de rejeitos (%)	C *	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1
	E ^{ns}	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0
Consumo específico de madeira (m³/tsa)	C *	3,133	3,407	3,772	4,334	3,857	4,090
	E *	2,949	3,225	3,527	3,973	3,718	3,920
Viscosidade (cm³/g)	C *	727	884	763	618	990	940
	E *	1034	1183	1119	918	1225	1168
Ácidos hexenurônicos (µmol/g)	C *	36,6	38,6	37,3	31,9	41,9	42,4
	E *	39,4	35,1	41,9	43,0	42,1	42,7
Número kappa corrigido	C ^{ns}	15,3	14,9	14,8	15,2	14,2	14,6
	E *	15,0	15,6	14,9	14,5	14,4	14,9
Análises dos licores negros							
Teor de sólidos totais (%)	C *	16,0	16,1	14,7	15,5	13,8	12,6
	E *	14,4	13,4	13,5	14,7	13,8	12,4
Teor de sólidos orgânicos (%)	C *	10,9	10,9	9,9	10,3	9,5	8,8
	E ^{ns}	9,9	9,3	9,4	9,7	9,6	8,7
Teor de sólidos inorgânicos (%)	C *	5,1	5,1	4,9	5,2	4,3	3,8
	E *	4,5	4,1	4,1	5,1	4,2	3,7
Teor de sólidos gerados (t/tsa)	C *	1,407	1,186	1,321	1,597	1,138	1,105
	E *	1,276	1,069	1,144	1,372	1,066	1,024
Álcali ativo consumido (g/L)	C *	26,5	24,4	26,8	29,7	23,6	24,1
	E *	25,1	25,2	24,5	28,3	23,6	22,5
Álcali ativo consumido por tonelada produzida (kg/tsa)	C *	202	171	197	240	162	164
	E *	181	167	169	209	156	147

U x T: *E. urophylla* x *E. tereticornis*; G x U: *E. grandis* x *E. urophylla*; U x G: *E. urophylla* x *E. grandis*; Ur: *E. urophylla*; HGr: *E. grandis* (híbrido); Gr: *E. grandis*. * Significativo a 95% de probabilidade ($p < 0,05$). ns: não significativo a 95% de probabilidade ($p > 0,05$).

4.5.1. Análises das polpas celulósicas

Para os dois tipos de processos estudados, as variáveis de controle foram a temperatura máxima e a carga alcalina aplicada, visando obter polpas celulósicas branqueáveis com número kappa na faixa de $18 \pm 5\%$ e álcali efetivo residual do licor negro entre 5 e 8 gNaOH/L.

O número kappa é uma forma indireta de mensurar o grau de deslignificação de determinada matéria-prima fibrosa e indica a lignina residual presente na polpa celulósica. Esse índice é considerado um dos principais parâmetros de controle de processo e se relaciona ao rendimento, carga alcalina aplicada, geração de sólidos, consumo de reagentes na etapa de branqueamento, entre outros.

Para a produção de polpas celulósicas branqueáveis a partir das madeiras de eucalipto, o número kappa comumente varia entre 15 e 20, sendo que o número kappa médio aplicado pelas indústrias brasileiras que processam madeiras de eucalipto varia entre 14,5 e 18,5 (CORREIA *et al.*, 2019). A escolha da faixa do número kappa aplicada nesse estudo ($18 \pm 5\%$) foi baseada em um valor usualmente aplicado para obtenção de polpas celulósicas branqueáveis a partir de madeiras de eucalipto. A variação de 5% adotada corresponde ao erro analítico permitido pela norma descrita na TAPPI T 236 om-99 para determinação do número kappa.

Observa-se na Tabela 17 que as polpas celulósicas obtidas pelos dois processos de polpação apresentaram nível de deslignificação dentro da faixa estabelecida. Tendo em vista que as polpas celulósicas obtidas nesse estudo a partir de diferentes matérias-primas apresentaram o mesmo nível de deslignificação, é possível realizar a comparação efetiva entre as mesmas e os respectivos processos de polpação.

Assim como para o número kappa, alguns autores recomendam que para a adequada comparação entre resultados de polpas celulósicas obtidas a partir de madeiras com características tecnológicas distintas, se faz necessário fixar uma faixa de álcali efetivo residual do licor negro. O álcali efetivo residual pode refletir a performance de polpação, como na precipitação de carboidratos e lignina durante o processo, sendo esses efeitos minimizados com a fixação de um intervalo. Entre as unidades industriais de produção de polpa celulósica, há uma ampla variação na faixa de álcali efetivo residual, que pode ir de 4 a 18 gNaOH/L, sendo preferível o intervalo entre 6 e 9 gNaOH/L (SOUZA, 2016; GOYAL, 2017).

Conforme demonstrado na Tabela 17, os resultados de álcali efetivo residual apresentaram valores dentro da faixa estabelecida como premissa (5 e 8 gNaOH/L), não sendo observada diferença significativa entre as madeiras e entre os processos ($p > 0,05$). Estudos recentes vêm demonstrando que, para polpas com o mesmo número kappa, cozimentos realizados com mais

baixos álcalis efetivos residuais proporcionaram aumento de rendimento, sem efeitos significativos ao processo de branqueamento (ABRANCHES, 2017; RIBEIRO; *et al.*, 2018).

Para as diferentes madeiras e processos estudados, foram necessários o emprego de cargas alcalinas e temperaturas distintas para atingir as premissas estabelecidas de número kappa e álcali efetivo residual. O álcali ativo variou de 18,0 a 24,0% para o processo convencional e de 18,0 a 23,0% para o estendido, correspondentes, em ambos os processos, às madeiras com densidades básicas de 0,416 e 0,465 g/cm³. Ao analisar a correlação existente entre densidade básica e álcali ativo aplicado, não foi observada correlação significativa entre esses parâmetros. Esse resultado indica que o uso de madeiras com diferentes densidades básicas não interferiu na demanda alcalina isoladamente. O comportamento observado nesse estudo foi diferente do obtido por Gomide *et al.* (2010), no qual foi constatada correlação positiva entre densidade básica e álcali ativo aplicado ($r=0,30^*$), muito embora o coeficiente de correlação obtido por esse autor possa ser considerado baixo.

Os diferentes comportamentos dos materiais genéticos estudados frente aos processos de polpação podem estar associados à outras características das madeiras, com destaque às características químicas. Na literatura encontram-se estudos que relatam correlação positiva entre o teor de lignina da madeira e o álcali ativo, sendo normalmente recomendada a seleção de materiais genéticos que apresentem o menor teor de lignina possível. Nesse estudo, contudo, não foram observadas correlações significativas entre esses parâmetros, provavelmente devido à baixa variabilidade do teor de lignina total entre os materiais estudados, que variou de 28,76 a 30,96%.

Entre os parâmetros de composição química avaliados, os teores de extrativos totais e de celulose foram os que apresentaram correlação significativa com o álcali ativo aplicado, conforme demonstrado na Figura 15.

Figura 15. Correlações entre teor de extrativos totais e álcali ativo (A) e entre teor de celulose e álcali ativo (B). * Significativo a 95% de probabilidade ($p < 0,05$).

Os extrativos da madeira são constituintes reconhecidamente indesejáveis aos processos de polpação, pois estes podem estar relacionados aos maiores consumos de reagentes. Essa relação é demonstrada na Figura 15 A, em que se observa que os teores de extrativos e álcali ativo aplicado apresentaram correlação significativa e positiva entre si, com coeficiente de Correlação de Pearson equivalente a $r=0,71^*$. A madeira de Ur foi a que demandou o maior álcali ativo em ambos os processos estudados, apesar de não ter apresentado o maior teor de extrativos. Essa madeira, no entanto, foi caracterizada com o menor teor de celulose, componente que apresentou correlação negativa ($r=-0,90^*$) com o álcali ativo, como demonstrado na Figura 15 B.

Além da carga alcalina aplicada, a temperatura máxima de cozimento também foi ajustada para alcançar as premissas desse estudo. As temperaturas máximas empregadas nos processos de polpação convencional variaram entre 165 e 170 °C e do tipo estendido, entre 147 e 151 °C (Tabela 17). Analisando a correlação existente entre as temperaturas máximas aplicadas e a densidade básica das madeiras, foi observada relação significativa entre esses parâmetros para o processo de polpação convencional ($r=0,52^*$). Já para os valores resultantes do processo estendido, foi obtida correlação não significativa ($r=0,09^{ns}$), indicando que a temperatura máxima ajustada nesse processo não foi afetada pela densidade básica da madeira utilizada.

O fator H expressa em uma única variável a relação entre temperatura e tempo de cozimento. Para o processo convencional, o fator H variou de 641 a 998 e de 378 a 534 para o estendido, o que representa variação máxima de 56,8 e 41,3%, respectivamente. Ao relacionar os resultados de fator H do processo convencional com os valores de densidade básica da madeira, obteve-se correlação positiva e significativa ($r=0,52^*$). Já para os resultados analisados a partir do processo de polpação estendido, não foi encontrada correlação significativa entre esses parâmetros ($r=0,06^{ns}$), resultado esperado tendo em vista que não foi observada correlação entre densidade básica e a temperatura máxima.

Diante dos diferentes comportamentos das madeiras analisadas frente aos processos de polpação estudados, variados rendimentos de processo foram obtidos. Na Tabela 18 são apresentados os resultados dos rendimentos depurados e o teste de médias, resultantes dos dois tipos de processos de polpação.

Tabela 18. Teste de médias para rendimentos depurados dos processos do tipo convencional (C) e estendido (E).

Parâmetro	Tipo	U x T	G x U	U x G	Ur	HGr	Gr
		0,610	0,513	0,487	0,465	0,445	0,416
Rendimento depurado (%)	C	47,1 (d)	51,5 (b)	49,0 (c)	44,7 (e)	52,4 (ab)	52,9 (a)
	E	50,0 (c)	54,4 (a)	52,4 (b)	48,7 (c)	54,4 (a)	55,2 (a)

U x T: *E. urophylla* x *E. tereticornis*; G x U: *E. grandis* x *E. urophylla*; U x G: *E. urophylla* x *E. grandis*; Ur: *E. urophylla*; HGr: *E. grandis* (híbrido); Gr: *E. grandis*. As médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

Para um mesmo nível de designificação, os rendimentos depurados do processo convencional variaram de 44,7 a 52,9% e do processo estendido, de 48,7 a 55,2%, correspondentes às madeiras de *Eucalyptus urophylla* (Ur) e *Eucalyptus grandis* (Gr) em ambos os processos. Essas espécies puras são reconhecidas pelo comportamento obtido nesse estudo, de baixo e alto rendimento, respectivamente para as espécies de *E. urophylla* e *E. grandis*. Essa tendência também foi observada em estudos desenvolvidos por outros autores (FOELKEL, *et al.*, 1978; MOKFIENSKI e COLODETTE, 2008; MAGATON, *et al.*, 2009).

Os resultados de rendimentos depurados apresentados na Tabela 18 indicam que a utilização de processos estendidos leva a um acréscimo médio de rendimento de aproximadamente 5,9%, ou 2,9 pontos percentuais. A obtenção de maiores rendimentos depurados pelo processo estendido pode estar relacionada à melhor impregnação da madeira e à menor degradação dos seus carboidratos, promovida pelo emprego de temperaturas de cozimento mais brandas, se comparado ao processo convencional.

O rendimento de processo foi citado como um dos objetivos dos programas de melhoramento genético desenvolvidos no Brasil, em que se visava a seleção de clones que proporcionassem rendimentos superiores a 50,0% (GOMIDE *et al.*, 2005). Tendo como base esse valor como limite mínimo para a seleção de materiais genéticos, nota-se que a partir dos resultados obtidos pelo processo convencional, metade dos materiais estudados seriam desconsiderados nessa seleção (U x T, U x G e Ur). Ao se analisar os mesmos materiais genéticos pelo processo estendido, observa-se que duas madeiras seriam selecionadas a mais, sendo excluído dessa seleção apenas um material (Ur).

Levando em consideração que os processos convencionais estão em desuso na grande maioria das indústrias produtoras de polpa celulósica brasileiras, sugere-se para os estudos de qualidade da madeira para produção de celulose o emprego do processo de polpação kraft estendido. Esse processo representa bem os atuais processos de polpação kraft modificados, guardada as devidas proporções, além de ser de fácil execução laboratorial, sendo necessários

apenas reduzir as temperaturas máximas de cozimento e aumentar o tempo total de cozimento. Complementarmente, sugere-se também utilizar uma faixa de número kappa para essas análises, com margem de erro de 5%, bem como a fixar o álcali efetivo residual do licor negro entre 5 e 8 gNaOH/L, possibilitando, assim, a comparação mais efetiva entre diferentes materiais genéticos estudados.

Na Figura 16 é demonstrada a relação entre os resultados de rendimento depurado obtidos pelos processos convencional e estendido.

Figura 16. Relação entre os rendimentos depurados obtidos nos processos convencional (C) e estendido (E). *Significativo a 95% de probabilidade ($p < 0,05$).

Os resultados de rendimento depurado obtidos pelo processo de polpação convencional apresentaram relação significativa e positiva com os alcançados pelo processo estendido, com correlação linear simples equivalente a $r=0,97^*$. Esses resultados demonstram que a base de dados laboratoriais obtida ao longo dos anos por meio dos processos convencionais pode, eventualmente, ser convertida para os resultados dos processos estendidos, possibilitando assim uma comparação mais factível com a realidade industrial atual.

Além do rendimento depurado, a densidade básica da madeira também foi utilizada como critério de seleção de materiais genéticos para os processos de polpação. No entanto, avaliar um material utilizando isoladamente o valor de densidade básica não é recomendado, pois outras características da madeira interferem nos parâmetros de processo. É preferível, portanto, avaliar os resultados das análises de qualidade da madeira conjuntamente. Na Figura 17 é apresentada a correlação entre a densidade básica da madeira e os rendimentos depurados, considerando os dois tipos de processos de polpação.

Figura 17. Relação entre densidade básica da madeira e rendimento depurado. * Significativo a 95% de probabilidade ($p < 0,05$).

Observa-se na Figura 17 que existe relação significativa entre a densidade básica da madeira e o rendimento depurado, para ambos os processos estudados. No entanto, apesar da relação observada, os coeficientes de determinação (R^2) das equações ajustadas são considerados baixos. Esses resultados demonstram que selecionar materiais unicamente pelo valor de densidade básica não é recomendável, sobretudo pelos resultados obtidos nesse estudo. Os menores rendimentos depurados foram resultantes da madeira com densidade básica intermediária (0,465 g/cm³) e os resultados de rendimentos depurados obtidos para a madeira com densidade básica de 0,513 g/cm³ foram estatisticamente equivalentes aos obtidos pelas madeiras menos densas.

Entre as demais características da madeira que podem influenciar nos resultados de rendimento depurado, destacam-se as suas propriedades químicas. Na Figura 18 são apresentados os resultados da correlação entre os parâmetros de composição química das madeiras estudadas com os valores de rendimento depurado.

Figura 18. Relações entre extrativos totais e rendimentos depurados (A) e entre teor de celulose e rendimentos depurados (B). * Significativo a 95% de probabilidade ($p < 0,05$).

Para as madeiras avaliadas nesse estudo, as características químicas que resultaram em correlações significativas com os rendimentos depurados foram o teor de extrativos totais e o teor de celulose, conforme apresentado na Figura 18. Em ambos os processos analisados, observa-se que o teor de extrativos das madeiras influenciou negativamente no rendimento depurado (Figura 18 A). A redução do rendimento depurado conforme o aumento do teor de extrativos relaciona-se com a maior carga alcalina demandada por esses materiais, conforme discutido anteriormente, resultando, consequentemente, em menores rendimentos.

A madeira de *E. urophylla* (Ur) resultou nos menores rendimentos, 44,7 e 48,7%, respectivamente para os processos convencional e estendido (Tabela 18). Os menores rendimentos obtidos por esse material relacionam-se à menor fração de glicanas e, consequentemente, ao menor teor de celulose observado para essa madeira. O teor de celulose se correlaciona positivamente com o rendimento de processo, como ilustrado na Figura 18 B, com correlação linear entre esses parâmetros equivalente a $r = 0,76^*$. Além disso, o teor de celulose apresentou correlação negativa com o álcali ativo, como já demonstrado, influenciando diretamente no rendimento depurado devido às maiores cargas alcalinas demandadas por essa madeira.

Ademais, a madeira de Ur apresentou a maior fração de xilanas, o que pode representar maior proporção de grupos acetila presentes nessa madeira. Em média, a cada 10 unidades de anidro-xilose, são observadas 5,5 unidades de grupos acetila (MAGATON *et al.*, 2008). A presença de grupos laterais de acetila nas xilanas pode ser desvantajosa, uma vez que aumentam o consumo de álcali pois são totalmente hidrolisados e solubilizados durante o cozimento, acarretando em perdas de rendimento (GOMIDE; FANTUZZI NETO, 2000; PEDRAZZI *et al.*, 2015).

Muitos autores relatam correlações positivas entre a relação das unidades monoméricas da lignina siringila e guaiacila (S/G) com a facilidade de deslignificação da madeira e, por sua vez,

com o rendimento de processo. Na Figura 19 são apresentadas as correlações entre a relação S/G e rendimento depurado.

Figura 19. Correlação entre relação S/G da lignina e rendimento depurado. * Significativo a 95% de probabilidade ($p < 0,05$).

Para as madeiras analisadas nesse estudo, foi observada correlação negativa entre a relação S/G e o rendimento depurado. Apesar de diversos autores citarem correlação positiva da relação siringila/guaiacila com a facilidade de deslignificação das madeiras, esse assunto ainda é controverso devido à heterogeneidade da madeira dentro da mesma espécie e pelo fato de alguns pesquisadores correlacionarem o rendimento de processo com os carboidratos da madeira, atribuindo à estrutura da lignina efeito secundário (MOKFIENSKI, 2004; GUERRA et al., 2008; FREITAS et al., 2018).

Entre os diversos parâmetros que devem ser analisados para as madeiras destinadas à produção de polpa celulósica, cita-se o teor de rejeitos. Os teores de rejeitos são porções da madeira que não foram suficientemente deslignificadas e se relacionam às regiões dos cavacos que possuem mais lignina, como nós e cascas, como também pela impregnação não homogênea do licor de cozimento para o interior da madeira durante o cozimento. Nesse estudo, os teores de rejeitos resultantes do processo convencional variaram de 0,1 a 0,3%, tendo sido observada diminuição média dos teores de rejeitos pelo processo estendido em 50% (Tabela 17).

O uso de madeiras mais densas ou menos porosas pode comprometer a penetração adequada do licor de cozimento para o interior da madeira, influenciando na eficiência da deslignificação da madeira e na geração de rejeitos. A partir dos dados obtidos nesse estudo, não

foi observada correlação significativa entre a densidade básica da madeira e o teor de rejeitos gerado ($r = 0,02^{ns}$). Os menores teores de rejeitos observados no processo de polpação estendido foram alcançados pelos maiores tempos de reação, à menores temperaturas. Em baixas temperaturas, um gradiente de reação é estabelecido no interior do cavaco, promovendo uma deslignificação mais homogênea e diminuindo os teores de rejeitos (SIXTA, 2008). Dessa maneira, alguns autores relatam que os processos modificados de polpação favorecem o uso de madeiras mais densas pela melhoria da eficiência de impregnação obtida (ALMEIDA, 2003; SEGURA, 2015).

Com base nos resultados de rendimento depurado e densidade básica das madeiras, é possível calcular o consumo específico de madeira. Esse parâmetro reflete no volume de madeira necessário para produção de uma tonelada de polpa celulósica e a sua determinação é fundamental no que diz respeito à tomada de decisões. A madeira representa o maior custo para produção de polpa celulósica, podendo chegar em até 60% do custo total. Tabela 19 são apresentados os resultados do teste de média para os consumos específicos de madeira.

Tabela 19. Teste de médias para consumo específico de madeira dos processos do tipo convencional (C) e estendido (E).

Parâmetro	Tipo	U x T	G x U	U x G	Ur	HGr	Gr
		0,610	0,513	0,487	0,465	0,445	0,416
Consumo específico de madeira (m ³ /tsa)	C	3,133 (e)	3,407 (d)	3,772 (c)	4,334 (a)	3,857 (c)	4,090 (b)
	E	2,949 (e)	3,225 (d)	3,527 (c)	3,973 (a)	3,718 (b)	3,920 (a)

U x T: *E. urophylla* x *E. tereticornis*; G x U: *E. grandis* x *E. urophylla*; U x G: *E. urophylla* x *E. grandis*; Ur: *E. urophylla*; HGr: *E. grandis* (híbrido); Gr: *E. grandis*. As médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

Os resultados apresentados na Tabela 19 demonstram que os menores valores de consumo específico de madeira foram alcançados utilizando-se os materiais genéticos mais densos, com destaque para atenuação desses resultados a partir do processo estendido, com redução média entre os processos de 5,7%. Considerando o mesmo material genético, ou seja, isolando a variação da densidade básica, observa-se que a redução do consumo específico de madeira pelo emprego do processo estendido de polpação relaciona-se ao incremento em rendimento depurado obtido por esse processo, que por sua vez se explica pelos fatores anteriormente apresentados.

Em uma abordagem teórica da madeira “ideal” para o uso em processo de polpação, pode-se inferir, com base nos resultados obtidos nesse estudo, que seria aquela que apresentasse a maior densidade básica possível e que resultasse no maior rendimento de processo, tendo em vista que essas condições favorecem a redução o consumo específico de madeira. Considerando as madeiras estudadas nesse trabalho, a madeira de *E. grandis* (Gr) foi a que apresentou os maiores rendimentos depurados, 52,9% pelo processo convencional e 55,2% pelo estendido, e a madeira

de *E. urophylla* x *E. tereticornis* (U x T), a maior densidade básica ($0,610 \text{ g/cm}^3$). Utilizando-se desses resultados, o consumo específico de madeira reduziria para $2,789 \text{ m}^3/\text{tsa}$ para os processos convencionais e $2,673 \text{ m}^3/\text{tsa}$ para os processos estendidos.

Na Figura 20 é ilustrado o efeito da densidade básica dos diferentes materiais genéticos estudados no consumo específico de madeira, calculados para os dois processos utilizados.

Figura 20. Relação entre densidade básica da madeira e consumo específico de madeira. * Significativo a 95% de probabilidade ($p < 0,05$).

Na Figura 20 é demonstrado que a densidade básica da madeira apresentou correlação significativa e negativa com os resultados de consumo específico de madeira. Essa relação demonstra que o uso de madeiras mais densas nos processos de polpação apresenta como vantagem a possibilidade de obtenção de polpas celulósicas utilizando-se menores volumes de madeira. Para os dados obtidos nesse estudo, não foram observadas correlações significativas entre os resultados de rendimento depurado com o consumo específico de madeira ($p > 0,05$). Dessa maneira, a redução do consumo específico de madeira é mais facilmente alcançada manipulando-se a densidade básica da madeira em detrimento do rendimento depurado.

Na avaliação da qualidade da madeira para a produção de polpa celulósica, além dos parâmetros quantitativos, é importante também analisar os aspectos qualitativos da polpa obtida. Um dos parâmetros utilizados para avaliar a qualidade da polpa é a viscosidade, que consiste em uma maneira indireta de verificar o nível médio de degradação dos carboidratos da madeira após o processo de polpação. Os resultados das viscosidades das polpas obtidas pelos dois processos são apresentados na Tabela 20, bem como o teste de médias.

Tabela 20. Teste de médias para viscosidade das polpas dos processos do tipo convencional (C) e estendido (E).

Parâmetro	Tipo	U x T	G x U	U x G	Ur	HGr	Gr
		0,610	0,513	0,487	0,465	0,445	0,416
Viscosidade (cm ³ /g)	C	727 (c)	884 (b)	763 (c)	618 (d)	990 (a)	940 (ab)
	E	1034 (b)	1183 (a)	1119 (ab)	918 (c)	1225 (a)	1168 (a)

U x T: *E. urophylla* x *E. tereticornis*; G x U: *E. grandis* x *E. urophylla*; U x G: *E. urophylla* x *E. grandis*; Ur: *E. urophylla*; HGr: *E. grandis* (híbrido); Gr: *E. grandis*. As médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

Observa-se na Tabela 20, tanto para as polpas obtidas pelo processo convencional, como pelo processo estendido, que as maiores viscosidades foram resultantes da madeira com densidade básica de 0,445 g/cm³ (HGr) e as menores, para as polpas da madeira com densidade básica de 0,465 g/cm³ (Ur). Para os dados obtidos nesse estudo, não foi observada correlação significativa entre a densidade básica da madeira e os resultados de viscosidade das polpas celulósicas ($r=-0,24^{ns}$). Esse resultado indica que a qualidade da polpa ao final do processo não está relacionada somente à densidade básica da madeira utilizada, mas também às demais características tecnológicas da madeira, em conjunto às condições de cozimento as quais as madeiras foram submetidas.

Para melhor visualizar o efeito das condições de cozimento na qualidade da polpa, é apresentada na Figura 21 a correlação obtida entre fator H e as viscosidade das polpas celulósicas.

Figura 21. Relação entre fator H e viscosidade das polpas não branqueadas. * Significativo a 95% de probabilidade ($p < 0,05$).

Observa-se na Figura 21 que as viscosidades das polpas não branqueadas se correlacionam negativamente com os valores de fator H, demonstrando que maiores temperaturas de cozimento, bem como tempos mais longos de reação, impactam diretamente nas viscosidades das polpas obtidas. Esse efeito pode ser notado nas viscosidades das polpas obtidas pelo processo estendido, em média 35% mais elevadas em comparação às obtidas pelo processo convencional.

No processo estendido foram empregadas temperaturas mais brandas, o que resultou na menor degradação das cadeias de carboidratos das madeiras e, consequentemente, em polpas com maiores viscosidades. O impacto da temperatura na qualidade da polpa celulósica foi verificado em estudo desenvolvido por Ferreira (2000), em que foi observada diminuição da viscosidade das polpas conforme a elevação da temperatura de cozimento.

Além do fator H, a qualidade da polpa celulósica pode ser afetada pela carga alcalina aplicada, que por sua vez se reflete nos resultados de rendimento. Na Figura 22 é apresentada a correlação obtida entre rendimento depurado e viscosidade das polpas.

Figura 22. Relação entre rendimento depurado e viscosidade das polpas não branqueadas. * Significativo a 95% de probabilidade ($p < 0,05$).

As viscosidades das polpas correlacionaram-se positivamente com os rendimentos depurados (Figura 22), sendo que os rendimentos mais elevados foram obtidos em virtude das menores cargas alcalinas aplicadas e, consequentemente, resultaram em menor degradação dos carboidratos e em maiores viscosidades das polpas. O mesmo comportamento foi observado em estudo desenvolvido por Trugilho *et al.* (2005), em que foi obtida correlação linear simples equivalente a 0,84 entre rendimento depurado e viscosidade das polpas.

É importante destacar que a interpretação dos resultados de viscosidade da polpa não branqueada no que se refere à predição da resistência mecânica das suas fibras precisa ser feita com cautela, visto que elevados valores desse parâmetro não indicam necessariamente a sua resistência. Gomes e Alves (2015) relataram que é difícil definir um valor crítico de viscosidade em que começa a ocorrer perdas de resistência na polpa e não recomendam finalizar o branqueamento da polpa celulósica com valores de viscosidade abaixo de 750 cm³/g.

Durante os processos alcalinos de polpação com madeiras de folhosas, ocorre a formação de ácidos hexenurônicos a partir de modificações dos ácidos 4-O-metilglucurônicos presentes nas xilanas. Os ácidos hexenurônicos presentes nas polpas celulósicas não branqueadas afetam negativamente a eficiência do processo de branqueamento, pois consomem quantidade significativa dos reagentes e se relacionam com a reversão de alvura ao final do processo. Na Figura 23 são apresentados os resultados de ácidos hexenurônicos das polpas obtidas.

Figura 23. Resultados dos ácidos hexenurônicos nas polpas expressos conforme o código e a densidade básica do material genético. As médias seguidas da mesma letra para cada tipo de processo não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey ($\alpha=0,05$). Letras minúsculas e maiúsculas entre parênteses referem-se ao teste de médias do processo convencional e estendido, respectivamente.

A dinâmica de formação dos ácidos hexenurônicos é influenciada tanto pelas variáveis de cozimento, como tempo, temperatura, carga alcalina e sulfidez, bem como pelo teor de ácidos urônicos originalmente presentes nas madeiras (GOMIDE *et al.*, 2005; CALDEIRA, 2007). Nesse estudo, os resultados obtidos para os ácidos hexenurônicos foram distintos devido aos diferentes

constituintes químicos das madeiras analisadas, como também às diferentes condições de cozimento aplicadas nos dois processos de polpação.

Os valores usuais de ácidos hexenurônicos nas polpas não branqueadas a partir das madeiras de eucalipto podem variar entre 25 e 80 $\mu\text{mol/g}$, dependendo do tipo de cozimento utilizado (CORREIA *et al.*, 2019). Observa-se na Figura 23 que os resultados das polpas obtidas nesse estudo encontram-se dentro dessa faixa, com variação máxima de 31,9 a 43,0 $\mu\text{mol/g}$, ambos os resultados obtidos para as polpas oriundas da madeira de *E. urophylla* (Ur). À exceção da polpa da madeira de G x U, foram observadas menores formações de ácidos hexenurônicos pelo processo de polpação convencional em comparação ao estendido. Nos processos de polpação convencional foram aplicadas maiores temperaturas e, para alguns materiais, demandadas altas cargas alcalinas para se atingir as premissas adotadas nesse estudo.

Almeida e Silva Júnior (2004) avaliaram a influência de diferentes cargas alcalinas na formação dos ácidos hexenurônicos em cozimentos com a madeira de *E. grandis* x *E. urophylla*. Esses autores verificaram que a relação entre álcali ativo aplicado e ácidos hexenurônicos foi quadrática, ou seja, até determinado álcali ativo aplicado, ocorre aumento dos ácidos hexenurônicos formados na polpa. Porém, nesse estudo foi observado que a partir da aplicação de carga de 23,2% (base NaOH), começa a ocorrer redução significativa nessa formação, devido a degradação dos ácidos hexenurônicos formados pelo próprio licor de cozimento, como também foi constatado em estudo desenvolvido por Gustavsson *et al.* (1999).

Esse comportamento é especialmente notado para os ácidos hexenurônicos formados nas polpas celulósicas de *E. urophylla* (Ur), que apresentaram resultados consideravelmente discrepantes entre os processos de polpação estudados. Ventorim e Caraschi (2009) avaliaram a formação de ácidos hexenurônicos em polpas celulósicas oriundas de cozimentos realizados com alta e baixa temperaturas e observaram maiores teores de ácidos hexenurônicos na polpa resultante do cozimento realizado à menor temperatura.

Li e Gellerstedt (1997) relataram que os ácidos hexenurônicos reagem com o permanganato de potássio e influenciam nos resultados obtidos de número kappa da polpa não branqueada. Esses autores recomendam o cálculo do número kappa corrigido, no qual é descontado do número kappa da polpa a participação dos ácidos hexenurônicos ao se considerar que para cada unidade de kappa, há 11,6 $\mu\text{mol/g}$ de ácidos hexenurônicos. Na Tabela 21 são apresentados os resultados de número kappa corrigido das polpas celulósicas analisadas.

Tabela 21. Número kappa corrigido.

Parâmetro	Tipo	U x T	G x U	U x G	Ur	HGr	Gr
		0,610	0,513	0,487	0,465	0,445	0,416
Número kappa corrigido	C	15,3 (a)	14,9 (a)	14,8 (a)	15,2 (a)	14,2 (a)	14,6 (a)
	E	15,0 (ab)	15,6 (a)	14,9 (ab)	14,5 (b)	14,4 (b)	14,9 (ab)

U x T: *E. urophylla* x *E. tereticornis*; G x U: *E. grandis* x *E. urophylla*; U x G: *E. urophylla* x *E. grandis*; Ur: *E. urophylla*; HGr: *E. grandis* (híbrido); Gr: *E. grandis*. As médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

Observa-se nos resultados apresentados na Tabela 21 que, apesar das polpas celulósicas inicialmente terem resultado em número kappa na faixa de $18 \pm 5\%$, os números kappa corrigidos de todos os materiais genéticos foram diferentes, devido às concentrações distintas de ácidos hexenurônicos. Os resultados obtidos para as polpas oriundas do processo convencional resultaram em médias estatisticamente equivalentes entre si. Já para as polpas do processo estendido, foram observados valores médios de número kappa corrigido estatisticamente distintos, porém com baixa variabilidade entre os valores máximo e mínimo. Apesar das diferenças observadas entre os números kappas corrigidos, pode-se inferir que as polpas celulósicas das amostras analisadas não devem apresentar diferenças de branqueabilidade se submetidas a uma mesma sequência de branqueamento.

4.5.2. Análises dos licores negros

Após o processo de polpação, parte da madeira que não é convertida em polpa celulósica, encontra-se dissolvida no licor negro. Em conjunto aos componentes orgânicos oriundos da madeira, também estão dissolvidos no licor negro compostos inorgânicos de sódio e enxofre, provenientes do licor branco de cozimento. A análise do licor negro ao final do processo de polpação fornece informações importantes para o controle de processo, como o álcali residual e o teor de sólidos diluídos.

Na Tabela 22 são apresentados os valores médios dos sólidos totais, orgânicos e inorgânicos avaliados das amostras de licores negros coletadas ao final de ambos os processos de polpação.

Tabela 22. Teste de médias para sólidos totais, orgânicos e inorgânicos analisados dos licores negros dos processos do tipo convencional (C) e estendido (E).

Parâmetro	Tipo	U x T	G x U	U x G	Ur	HGr	Gr
		0,610	0,513	0,487	0,465	0,445	0,416
Sólidos totais (%)	C	16,0 (a)	16,1 (a)	14,7 (ab)	15,5 (a)	13,8 (ab)	12,6 (b)
	E	14,4 (ab)	13,4 (ab)	13,5 (ab)	14,7 (a)	13,8 (ab)	12,4 (b)
Sólidos orgânicos (%)	C	10,9 (a)	10,9 (a)	9,9 (ab)	10,3 (ab)	9,5 (ab)	8,8 (b)
	E	9,9 (a)	9,3 (a)	9,4 (a)	9,7 (a)	9,6 (a)	8,7 (a)
Sólidos inorgânicos (%)	C	5,1 (a)	5,1 (a)	4,9 (a)	5,2 (a)	4,3 (ab)	3,8 (b)
	E	4,5 (ab)	4,1 (b)	4,1 (b)	5,1 (a)	4,2 (ab)	3,7 (b)

U x T: *E. urophylla* x *E. tereticornis*; G x U: *E. grandis* x *E. urophylla*; U x G: *E. urophylla* x *E. grandis*; Ur: *E. urophylla*; HGr: *E. grandis* (híbrido); Gr: *E. grandis*. As médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

O teor de sólidos totais, que corresponde ao somatório dos sólidos orgânicos e inorgânicos, geralmente varia entre 14 e 16%. Para entrar na caldeira de recuperação, o licor negro fraco passa por uma série de evaporadores com o intuito de concentrar o teor de sólidos em até aproximadamente 80%, possibilitando, posteriormente à essa etapa, a queima dos sólidos orgânicos e a recuperação dos reagentes químicos, que retornarão para o licor branco (SILVA JÚNIOR; BRITO, 2008).

Uma das preocupações em se utilizar madeiras mais densas nos processos de polpação estaria relacionada a maior formação de sólidos totais no licor negro ao final do processo e, conseqüentemente, na provável sobrecarga da caldeira de recuperação, já que essa possui capacidade limitada de queima. Essas madeiras geralmente demandam maiores cargas alcalinas para serem deslignificadas, resultando em maiores teores de sólidos inorgânicos dissolvidos no licor negro e na maior degradação da madeira (maior formação de sólidos orgânicos).

Nota-se pelos resultados apresentado na Tabela 22 que os sólidos totais dos licores negros provenientes do processo convencional apresentaram valores mais elevados para as madeiras mais densas (U x T e G x U) e também para a madeira de mais difícil deslignificação (Ur). No entanto, para os resultados do processo estendido, observa-se que os sólidos totais das madeiras mais densas (U x T e G x U) apresentaram médias estatisticamente equivalentes às madeiras menos densas (HGr e Gr). Esses resultados indicam a vantagem em se utilizar o processo estendido para as madeiras com maiores densidades básicas no que concerne à menor formação dos sólidos totais.

Entre os processos estudados, observa-se que os sólidos totais dos licores negros analisados do processo estendido apresentaram uma redução média de 7,0% em comparação ao convencional, com redução mais acentuada para as madeiras mais densas, equivalente a 10,1% para a madeira de U x T e 16,6% para a G x U. Ao verificar a correlação existente entre os sólidos totais com a densidade básica, foi obtida correlação significativa entre esses parâmetros apenas para os

resultados do processo convencional ($r=0,66$), o que indica que a formação de sólidos utilizando-se o processo estendido pode estar associada a outras características da madeira ou do processo em si. Um dos objetivos dos processos modificados de polpação, como o Lo-Solids®, é a redução dos sólidos ao final do processo, em especial dos sólidos orgânicos. Essa redução reflete em maiores rendimentos e viscosidades das polpas obtidas, vantagens também observadas nos resultados analisados das polpas provenientes do processo estendido aplicado nesse estudo.

Os sólidos orgânicos são resultantes dos componentes da madeira que foram degradados durante o processo de polpação, como a lignina, as hemiceluloses e a celulose, e apresentaram associação linear negativa entre os sólidos orgânicos e os rendimentos depurados ($r=-0,53$). Nos resultados apresentados na Tabela 22, observa-se redução dos sólidos orgânicos nos licores coletados do processo estendido, devido aos maiores rendimentos depurados obtidos nesse processo, refletindo, consequentemente, na menor degradação da madeira e em menores sólidos orgânicos.

Uma das vantagens do processo de polpação kraft é a recuperação dos reagentes químicos contidos no licor negro, representados pelos sólidos inorgânicos, que voltarão ao sistema para serem utilizados em novos cozimentos. Entre os processos estudados, observa-se na Tabela 22 que houve redução média de 9,4% dos sólidos inorgânicos diluídos nos licores negros coletados do processo estendido. Os sólidos inorgânicos se relacionam com a carga alcalina aplicada e, para os dados obtidos nesse estudo, observa-se correlação significativa entre esses parâmetros equivalente a $r=0,74$.

O teor de sólidos gerados por tonelada de polpa celulósica produzida também é um importante parâmetro a ser avaliado. A caldeira de recuperação em que os sólidos são queimados, em função da sua capacidade projetada de queima, pode representar um gargalo produtivo. O teor de sólidos gerados representa o somatório dos sólidos orgânicos e inorgânicos e para a sua determinação são considerados os rendimentos de processo e a carga alcalina aplicada. Na Tabela 23 são apresentados os resultados médios de teor de sólidos gerados para os materiais genéticos estudados, de acordo com o processo de polpação aplicado.

Tabela 23. Teste de médias para teor de sólidos gerados nos processos do tipo convencional (C) e estendido (E).

Parâmetro	Tipo	U x T	G x U	U x G	Ur	HGr	Gr
		0,610	0,513	0,487	0,465	0,445	0,416
Teor de sólidos gerados (t/tsa)	C	1,407 (b)	1,186 (d)	1,321 (c)	1,597 (a)	1,138 (de)	1,105 (e)
	E	1,276 (b)	1,069 (cd)	1,144 (c)	1,372 (a)	1,066 (e)	1,024 (e)

U x T: *E. urophylla* x *E. tereticornis*; G x U: *E. grandis* x *E. urophylla*; U x G: *E. urophylla* x *E. grandis*; Ur: *E. urophylla*; HGr: *E. grandis* (híbrido); Gr: *E. grandis*. As médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

Os sólidos gerados são afetados diretamente pelos rendimentos de processo e pela carga alcalina aplicada, não tendo sido observada correlação significativa com a densidade básica isoladamente. Entre os materiais estudados, os menores valores foram obtidos para a madeira de *E. grandis* (Gr), resultados esperados tendo em vista que esse material demandou as menores cargas alcalinas e resultou nos maiores rendimentos em ambos os processos analisados. Os maiores teores de sólidos gerados foram para a madeira de *E. urophylla* (Ur), que demandou as condições mais drásticas de cozimento e resultou nos menores rendimentos, seguidos pelos resultados obtidos a partir da madeira mais densa (U x T).

Assim como para os sólidos totais, os sólidos gerados por tonelada de polpa celulósica produzida diminuiram utilizando-se o processo estendido. Observa-se na Tabela 23 redução média de 10,1% dos sólidos gerados pelo processo estendido em relação ao convencional, com redução mais acentuada para os sólidos da madeira de Ur, equivalente a 14,1%. A atenuação dos sólidos gerados pode representar aumento da capacidade produtiva de polpa celulósica de uma unidade industrial, uma vez que essa é comumente controlada pela capacidade de queima dos sólidos na caldeira de recuperação.

Tomando-se como exemplo apenas a etapa de polpação de uma unidade fabril, a qual possui uma caldeira de recuperação com capacidade máxima de queima de 9.000 toneladas de sólidos por dia e que opere 352 dias anualmente, é possível estimar a capacidade máxima produtiva de polpa celulósica, baseando-se nos resultados obtidos de sólidos totais gerados. Para essa simulação, foi estimada a contribuição da etapa de pré-deslignificação com oxigênio na formação de sólidos totais equivalente a 0,2, somando-se esse valor aos resultados apresentados na Tabela 23. Na Tabela 24 são apresentados os resultados dessa simulação quanto as capacidades máximas diária e anual de produção de polpa celulósica pelos processos convencional e estendido.

Tabela 24. Estimativas das capacidades produtivas diária e anual de polpa celulósica a partir do processo convencional (C) e estendido (E).

Parâmetro	Tipo	U x T	G x U	U x G	Ur	HGr	Gr
		0,610	0,513	0,487	0,465	0,445	0,416
Produção diária (tsa)	C	5.600	6.496	5.916	5.007	6.726	6.897
	E	6.097	7.093	6.697	5.726	7.109	7.352
Produção anual (tsa)	C	1.971.330	2.286.455	2.082.301	1.762.511	2.367.506	2.427.860
	E	2.146.169	2.496.625	2.357.217	2.015.503	2.502.337	2.588.070
Incrementos (tsa)	diário	497	597	781	719	383	455
	anual	174.839	210.170	274.916	252.992	134.832	160.210
	%	8,9	9,2	13,2	14,4	5,7	6,6

U x T: *E. urophylla* x *E. tereticornis*; G x U: *E. grandis* x *E. urophylla*; U x G: *E. urophylla* x *E. grandis*; Ur: *E. urophylla*; HGr: *E. grandis* (híbrido); Gr: *E. grandis*.

Considerando-se exclusivamente a caldeira de recuperação (capacidade nominal de 9.000 tss/dia) como fator limitante a produção de polpa celulósica (gargalo), observa-se nos resultados apresentados na Tabela 24 que as reduções dos teores de sólidos gerados pelo processo estendido possibilitariam incrementos percentuais da produção de polpa celulósica entre 5,7 a 14,4%, o que representaria anualmente um ganho produtivo de 134.832 a 252.992 tsa, respectivamente para as madeiras de HGr e Ur.

Entre as madeiras analisadas nesse estudo e baseando-se nos resultados de sólidos gerados, pode-se dizer que a madeira de *E. grandis* (Gr) representaria maior capacidade produtiva de polpa celulósica, com menor sobrecarga à caldeira de recuperação. Já o uso da madeira de *E. urophylla* (Ur) poderia apresentar um gargalo produtivo, devido aos maiores sólidos gerados por essa madeira para serem queimados na caldeira. Essas espécies foram as que apresentaram, respectivamente, os maiores e menores rendimentos de processo, conforme mencionado anteriormente, o que interferiu diretamente na quantidade de sólidos gerados.

A formação dos sólidos no licor negro relaciona-se com o consumo de álcali durante o processo de polpação, sendo que geralmente quanto maior o consumo, mais sólidos são gerados ao final do processo. Na Tabela 25 são apresentados os resultados do álcali ativo total consumido pelos processos convencional e estendido.

Tabela 25. Teste de médias para álcali ativo consumido nos processos do tipo convencional (C) e estendido (E).

Parâmetro	Tipo	U x T	G x U	U x G	Ur	HGr	Gr
		0,610	0,513	0,487	0,465	0,445	0,416
Álcali ativo consumido (g/L)	C	26,5 (ab)	24,4 (b)	26,8 (ab)	29,7 (a)	23,6 (b)	24,1 (b)
	E	25,1 (a)	25,2 (ab)	24,5 (ab)	28,3 (a)	23,6 (b)	22,5 (b)

U x T: *E. urophylla* x *E. tereticornis*; G x U: *E. grandis* x *E. urophylla*; U x G: *E. urophylla* x *E. grandis*; Ur: *E. urophylla*; HGr: *E. grandis* (híbrido); Gr: *E. grandis*. As médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

Para um mesmo nível de deslignificação, observa-se na Tabela 25 diferentes consumos de álcali entre as madeiras e os tipos de processos de polpação aplicados. Essas variações são decorrentes das diferentes características químicas das madeiras estudadas, como os teores de extrativos e de celulose, componentes que se correlacionaram com o álcali ativo aplicado, conforme discutido anteriormente. Para o processo convencional, o álcali ativo consumido variou de 23,6 a 29,7 g/L correspondentes às madeiras de HGr e Ur e para o estendido, de 22,5 a 28,3 g/L, para as madeiras de Gr e Ur.

A partir dos resultados de álcali ativo consumido, rendimento depurado e relação licor:madeira, foram calculados os álcalis ativos consumidos por tonelada de polpa celulósica não branqueada produzida, conforme ilustrado na Figura 24.

Figura 24. Álcali ativo consumido por tonelada de polpa celulósica produzida pelos processos de polpação convencional (C) e estendido (E). As médias seguidas da mesma letra para cada tipo de processo não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey ($\alpha=0,05$). Letras minúsculas e maiúsculas entre parênteses referem-se ao teste de média do processo convencional e estendido, respectivamente.

Observa-se na Figura 24 que, ao empregar o processo estendido, houve redução média em 9,0% do álcali ativo consumido para se produzir uma tonelada de polpa celulósica não branqueada, em relação ao processo convencional. Essa redução é vantajosa ao se considerar que o consumo de álcali se relaciona à etapa de caustificação da fábrica de celulose, onde é produzido o licor branco e, dependendo do seu dimensionamento, pode limitar a capacidade produtiva da unidade fabril (SEGURA, 2015). Em ambos os processos estudados, a madeira de Ur foi a que apresentou o maior consumo de álcali entre as madeiras avaliadas, o que pode representar sobrecarga na área de caustificação. Já as madeiras de HGr, Gr e G x U, respectivamente com densidades básicas de 0,416, 0,445 e 0,513 g/cm³ apresentaram, em ambos os processos aplicados, os menores consumos de álcali, com médias estatisticamente equivalentes entre si.

5. CONCLUSÕES

As madeiras de *Eucalyptus* estudadas apresentaram densidades básicas distintas, entre 0,416 (Gr) e 0,610 g/cm³ (U x T), bem como características químicas e dimensões de fibras também variadas.

Com relação às características das madeiras de *Eucalyptus* estudadas, pode-se concluir que:

- Existem correlações lineares simples entre a densidade básica e o teor de extrativos totais e o teor de holocelulose para as madeiras estudadas;
- Existem correlações lineares simples entre a densidade básica e largura da fibras, diâmetros de lume, fração parede e porosidade das madeiras.

Com relação aos processos de polpação considerados neste trabalho, pode-se concluir que:

- O processo de polpação kraft estendido, independentemente das densidades básicas das madeiras utilizadas, proporcionou maiores rendimentos depurados, menores teores de rejeitos, menores consumos específicos de madeira, maiores viscosidades das polpas e menores teores de sólidos totais gerados, em comparação ao processo kraft convencional;
- Os maiores rendimentos depurados obtidos pelo processo de polpação kraft estendido impacta positivamente na estratégia de programas de Qualidade da Madeira para produção de polpa celulósica, especialmente os que consideram a densidade básica como parâmetro de seleção, pois há uma ampliação da gama de materiais genéticos para seleção e melhoramento genético florestal.

Os resultados obtidos nesse estudo demonstram que a análise isolada da densidade básica em estudos de qualidade da madeira para processos de polpação deve ser acompanhada da análise de outras características da madeira, que por sua vez também interferem na eficiência do processo de polpação e na qualidade da polpa celulósica obtida.

O processo de polpação kraft estendido demonstrou ser uma alternativa simplificada para a simulação laboratorial de processos modificados de polpação. Recomenda-se a sua adoção como procedimento para avaliação da Qualidade da Madeira de eucalipto destinada à produção de polpa

celulósica kraft por estar alinhada a atual realidade tecnológica dos processos de polpação kraft em escala industrial utilizados no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ABRAF. *Anuário Estatístico ABRAF*.
- ABRANCHES, W. P. DE O. *EFEITO DO ÁLCALI EFETIVO RESIDUAL NA PRODUÇÃO DE POLPA KRAFT BRANQUEADA DE EUCALIPTO*. 2017. Universidade Federal de Viçosa, 2017.
- ACOSTA, M. S.; MASTRANDREA, C.; LIMA, J. T. Wood Technologies and Uses of Eucalyptus wood from Fast Frown Plantation for Solid Products. 2008, [S.l: s.n.], 2008. p. 1–12.
- AGGARWAL, P.; CHAUHAN, S. Longitudinal growth strains in five clones of Eucalyptus tereticornis Sm. *Journal of Forestry Research*, v. 24, n. 2, p. 339–343, 2013.
- ALMEIDA, F. S. DE. *Influência da carga alcalina no processo de polpação Lo-Solids® para madeiras de eucalipto*. 2003. 131 f. 2003.
- ALMEIDA, F. S.; SILVA JÚNIOR, F. G. Influence of alkali charge on hexenuronic acid formation and pulping efficiency for Lo-Solids® cooking of eucalyptus. *TAPPI Fall Technical Conference*, n. March, p. 93–105, 2004.
- ALVES, I. C. N. *et al.* Caracterização tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de celulose kraft. *Ciência Florestal*, v. 21, n. 1, p. 167–174, 2011.
- 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/Forest Sciences*, n. 68, p. 87–95, 2005.
- ANDBACKA, S.; SVANBERG, J. Isothermal cooking and pulp washing in a modern fiber line. 1997, [S.l: s.n.], 1997.
- ANDRADE, J. O. M.; ZVINAKEVICIUS, C.; FOELKEL, C. E. B. Estudos sobre a influência da espessura dos cavacos de eucalipto sobre a qualidade da celulose kraft correspondente. *O Papel*, v. 39, n. 10, p. 55–59, 1978.
- ANTUNES, F. S. *Avaliação da qualidade da madeira das espécies Acacia crassicarpa, Acacia mangium, Eucalyptus nitens, Eucalyptus globulus e Populus tremuloides*. 2009. 81 f. Escola Superior de Agricultura - Universidade de São Paulo, 2009.
- ASSIS, T. F.; ABAD, J. I. M.; AGUIAR, A. Melhoramento genético do eucalipto. *Melhoramento Genético do Eucalipto*. [S.l: s.n.], 2015. p. 25.
- ASSIS, T. F.; RESENDE, M. D. V. DE. Genetic improvement of forest tree species. *Crop breeding and applied biotechnology*, p. 44–49, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11941: Madeira - Determinação da densidade básica*. . [S.l: s.n.]. , 2003a
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11941: Madeira - Determinação da*

densidade básica. . Rio de Janeiro: [s.n.], 2003b

BALDIN, T. *et al.* Anatomia da madeira e potencial de produção de celulose e papel de quatro espécies jovens de *Eucalyptus* L'Hér. *Ciência da Madeira - Brazilian Journal of Wood Science*, v. 8, n. 2, p. 114–126, 2017. Disponível em: <<https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/cienciadamadeira/article/view/10672/rcm.v8n2p114-126>>.

BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. Variabilidade longitudinal e radial da madeira de *Eucalyptus grandis*. 1984, [S.l: s.n.], 1984. p. 403–409. Disponível em: <http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/Arquivo_01_Variabilidade_madeira_e_grandis.pdf>.

BARRICHELO, LUIS ERNESTO GEORGE; BRITO, J. O. *A madeira das espécies de eucalipto como matéria prima para a indústria de celulose e papel*. PRODEPEF. [S.l.]: PRODEPEF. , 1976

BASSA, A. *Processos de polpação kraft convencional e modificado com madeiras de E. grandis e híbrido (E. grandis x E. urophylla)*. 2002a. 119 f. 2002.

BASSA, A. *Processos de Polpação Kraft Convencional e Modificado com Madeiras de E.grandis e Híbrido (E.grandis x E.urophylla)*. 2002b. 103 f. 2002.

BASSA, ANA GABRIEL MONNERAT CARVALHO. *Misturas de madeira de Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla, Eucalyptus globulus e Pinus taeda para produção de celulose Kraft através do Processo Lo-Solids®*. 2006. 169 f. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz- Universidade de São Paulo, 2006.

BASSA, ANA GABRIELA MONNERAT CARVALHO; JUNIOR, F. G. DA S.; SACON, V. M. Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* para produção de celulose kraft através do Processo Lo-Solids®. *Scientia Forestalis*, n. 75, p. 19–29, 2007.

BEKTAS, I.; TUTUS, A.; EROGLU, H. A study of the suitability of Calabrian Pine (*Pinus burtia*, Jen) for pulp and paper manufacture. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, v. 23, n. 3, p. 589–597, 1999.

BERTOLA, A. Eucalipto - 100 anos de Brasil - “Falem mal, mas continuem falando de mim!” *Setor de Inventário Florestal*. [S.l: s.n.], 2013. p. 91.

BERTOLUCCI, F. L. G.; DEMUNER, B. J.; LA TORRACA, S. M. *Estimativas de parâmetros genéticos e fenotípicos para características de madeira e polpa de eucalipto*. . [S.l: s.n.], 1992.

BONFATTI JÚNIOR, E. A. *Deslignificação com oxigênio para polpa kraft com alto número kappa*. 2014. 115 f. 2014.

BORRALHO, N.M, G. *Eucalyptus Plantations*. [S.l: s.n.], 2003.

BORRALHO, N. M. G.; COTTERILL, P. P. Breeding objectives for pulp production of *Eucalyptus globulus* under different industrial cost structures. *Canada Journal Forest Research*, v. 23,

p. 648–656, 1993.

BRANDÃO, N. A. L. *Repetitividade e Reprodutibilidade na Validação de Métodos para Testes de Germinação de sementes de espécies florestais*. 2013. 108 f. 2013.

BROWN, R. Beyond kraft? Is kraft pulping as good as it gets? *Tappi Journal*, v. 13, n. 10, 2014.

BUSNARDO, C. A. *et al.* Em busca da qualidade ideal da madeira do eucalipto para produção de celulose. IV. Altura ideal de amostragem para avaliação da densidade média para árvores de *E. grandis*. 1987, [S.l: s.n.], 1987. p. 16.

BUSNARDO, C. A.; FOELKEL, C. E. B.; REGAZZI, A. J. *Deslignificação da madeira de Eucalyptus urophylla de origem híbrida pelo processo kraft*. . [S.l: s.n.], 1982.

CALDEIRA, A. F. *Efeito das condições de processo sobre a produção de ácidos hexenurônicos em polpas celulósicas*. 2007. 124 f. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CAMARGO, S. K. DE C. A.; SILVA, T. J.; COSTA, D. DE M. Influência da dimensão e qualidade dos cavacos na polpação. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 19, n. 3, p. 813–820, 2015.

CARVALHO, A. G. M. *Relação siringila/ guaiacila na lignina e suas implicações*. 2002. 40 f. Universidade Federal de Viçosa, 2002.

CARVALHO, A. M. *VALORIZAÇÃO DA MADEIRA DO HÍBRIDO EUCALYPTUS GRANDIS X EUCALYPTUS UROPHYLLA ATRAVÉS DA PRODUÇÃO CONJUNTA DE MADEIRA SERRADA EM PEQUENAS DIMENSÕES, CELULOSE E LENHA*. 2000. 138 f. 2000.

CARVALHO, D. M. DE; SILVA, M. R.; COLODETE, J. L. Estudo da relação entre condições de polpação e propriedades físico-mecânicas do papel. *Revista Árvore*, v. 39, n. 3, p. 575–584, 2015.

CASTRO, C. A. DE O. *et al.* Brief history of Eucalyptus breeding in Brazil under perspective of biometric advances. *Ciência Rural*, v. 46, n. 9, p. 1585–1593, 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782016000901585&lng=en&tlng=en>.

CHERELLI, S. G. *et al.* Heartwood and sapwood in eucalyptus trees : non-conventional approach to wood quality. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 90, n. 1, p. 425–438, 2018.

Climate Data. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/>>. Acesso em: 27 fev. 2019.

COELHO, M. U. Avaliação tecnológica da madeira de *Pinus maximinoi* visando sua utilização industrial na produção de celulose kraft. p. 91, 2017a.

COELHO, M. U. *Avaliação tecnológica da madeira de Pinus maximinoi visando sua utilização industrial na produção de celulose kraft*. 2017b. 91 f. 2017.

CORREIA, F. M.; D'ANGELO, J. V. H.; SILVA JÚNIOR, F. G. REVISITANDO NÚMERO

- KAPPA : CONCEITOS. *O Papel*, v. 80, n. January, p. 77–89, 2019.
- DANG, V. Q.; NGUYEN, K. L. A universal kinetic model for characterisation of the effect of chip thickness on kraft pulping. *Bioresource Technology*, v. 99, n. 5, p. 1486–1490, 2008.
- DILLNER, B.; LARSON, L.-O.; TIBBLING, P. Nonchlorine bleaching of pulp produced by the modified continuous cooking process. *Tappi Journal*, v. 73, n. 8, p. 167–172, 1990.
- DINUS, R. J.; WELT, T. Tailoring fiber properties to paper manufacture: Recent developments. *Tappi Journal*, v. 80, n. 4, p. 127–139, 1997.
- DOSSA, D. *et al.* *Produção e Rentabilidade do Eucalipto em Empresas Florestais. Comunicado Técnico 83 - Embrapa Florestas.* [S.l: s.n.], 2002
- DUARTE, F. *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 f. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz- Universidade de São Paulo, 2006.
- ENDO, M. CAMCORE: Twelve years of contribution to reforestation in the Andean region of Colombia. *Forest Ecology and Management*, v. 63, n. 2–3, p. 219–233, 1994.
- FANTUZZI NETO, H. *Dissolução de constituintes químicos da madeira de Eucalyptus grandis durante a polpação Kraft convencional e modificada.* 1997. 54 f. 1997.
- FARIA FILHO, D. E.; JARUCHE, Y. DE G.; LEAL, D. H. V. Classificação de coeficientes de variação na experimentação com coelhos no Brasil. *Ciencia Animal Brasileira*, v. 17, n. 4, p. 519–526, 2016.
- FENGEL, D.; WEGENER, G. *Wood : Chemistry, Ultrastructure, Reactions.* Munich, Germany: Walter de Gruyter, 1984. v. 10.
- FERNANDES, D. E. *et al.* Influência da produtividade de clones híbridos de eucalipto na densidade da madeira e na polpação Kraft. *Scientia Forestalis*, v. 39, n. 90, p. 143–150, 2011.
- FERREIRA, C. R. *et al.* Avaliação tecnológica de clones de eucalipto : parte 1 - qualidade da madeira para produção de celulose Kraft. *Scientia Forestalis*, n. 70, p. 161–170, 2006.
- FERREIRA, C. R. DA S. *Otimização Do Perfil De Temperatura Na Polpação RDH De Eucalyptus sp.* 2000. 91 f. 2000.
- FERREIRA, M.; KAGEYAMA, P. Y. *Boletim informativo IPEF, Piracicaba, v.6, n.20, p A.1 – A.14 – Melhoramento genético da densidade da madeira de eucalipto.* . [S.l: s.n.], 1978
- FLORES, T. B. *et al.* *Eucalyptus no Brasil: zoneamento climático e guia para identificação.* [S.l.]: IPEF, 2016.
- FOELKEL, C. E. B. As fibras dos eucaliptos e as qualidades requeridas na celulose kraft para a fabricação de papel. *Eucalyptus Online Book e Newsletter.* [S.l: s.n.], 2007. p. 48.
- FOELKEL, C. E. B. Cálculos , Problemas e Balanços Aplicados ao Setor de Produção de Celulose e Papel de Eucalipto. *Eucalyptus Online Book.* [S.l: s.n.], 2015. p. 1–177.

- FOELKEL, C. E. B. O Processo de Impregnação dos Cavacos de Madeira de Eucalipto pelo Licor Kraft de Cozimento. *Eucalyptus Online Book e Newsletter*. [S.l: s.n.], 2009. p. 2–97.
- FOELKEL, C. E. B.; MILANEZ, A. F.; BUSNARDO, C. A. *Método do Máximo Teor de Umidade aplicado à Determinação de Densidade Básica da Madeira de Eucalipto*. . [S.l: s.n.], 1983.
- FOELKEL, C.; MORA, E.; MENOCELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. *O Papel*, v. 53, n. 5, p. 35–40, 1992.
- 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 produção de celulose sulfato. *IPEF*, n. 10, p. 17–37, 1975.
- FOELKEL, CELSO EDMUNDO B. *Qualidade da Madeira do Eucalipto Acerca dos Acertos e Erros na Utilização da Densidade Básica como Indicador de Qualidade de Madeiras*. *Eucalyptus Online Book e Newsletter*. [S.l: s.n.], 2015
- FOELKEL, CELSO EDMUNDO BOCHETTI. *Boletim informativo IPEF- I Congresso Brasileiro sobre a qualidade da madeira - Madeira do eucalipto: da floresta ao digestor*. . [S.l: s.n.], 1978
- FOELKEL, CELSO EDMUNDO BOCHETTI *et al.* *Em busca da qualidade ideal da madeira de eucalipto para produção de celulose - Eucalyptus tropicais*. . [S.l: s.n.], 1984.
- FOELKEL, CELSO EDMUNDO BOCHETTI *et al.* *Eucaliptos tropicais na produção de celulose kraft*. . [S.l: s.n.], 1978.
- FOELKEL, CELSO EDMUNDO BOCHETTI. *Kraft pulp yields of eucalypt wood in relation to degree of delignification and wood specific gravity*. . [S.l: s.n.], 1976.
- FOELKEL, CELSO EDMUNDO BOCHETTI; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. *IPEF*, n. 2/3, p. 65–74, 1971. Disponível em: <<http://ipef.br/publicacoes/scientia/nr02-03/cap04.pdf>>. Acesso em: 17 mar. 2016.
- FOELKEL, CELSO EDMUNDO BOCHETTI; SANI, A. Presente, passado e perspectivas futuras na utilização do eucalipto pela indústria de celulose no Brasil. 1976, [S.l: s.n.], 1976. p. 16.
- FOELKEL, CELSO EDMUNDO BOCHETTI; ZVINAKEVICIUS, C.; ANDRADE, J. O. M. A qualidade do eucalipto. *Silvicultura*, p. 11, 1978.
- FONSECA, S. M.; OLIVEIRA, R. C.; SILVEIRA, P. N. Seleção da árvore industrial – procedimentos, riscos, custos e benefícios. *Revista Árvore*, v. 20, n. 1, p. 69–85, 1996.
- FREITAS, T. P. *et al.* Environmental effect on chemical composition of eucalyptus clones wood for pulp production. *Cerne*, v. 24, n. 3, p. 219–224, 2018.
- GOMES, F. J. B.; ALVES, E. F. Propriedades de polpas branqueadas. Propriedades físicas.

Branqueamento de polpa celulósica: da produção da polpa marrom ao produto acabado. Viçosa: [s.n.], 2015. p. 721–734.

GOMES, I. M. DE B.; PEREIRA, A. M.; YODOVAL, P. Mix de madeiras: a busca do melhor desempenho global. 1998, [S.l: s.n.], 1998. p. 14.

GOMIDE, J. L. *et al.* CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA, PARA PRODUÇÃO DE CELULOSE, DA NOVA GERAÇÃO DE CLONES DE *Eucalyptus* DO BRASIL. *Revista Árvore*, v. 29, n. 1, p. 129–137, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/%0D/rarv/v29n1/24242.pdf>>.

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L. Qualidade da madeira. *Biotechnologia florestal*. [S.l: s.n.], 2007. p. 25–54.

GOMIDE, J. L.; FANTUZZI NETO, H. Aspectos Fundamentais da Polpacao Kraft de Madeira de *Eucalyptus*. *O Papel (Brasil)*, v. 61, n. 3, p. 62–68, 2000.

GOMIDE, J. L.; FANTUZZI NETO, H.; REGAZZI, A. J. Análise de Critérios de qualidade da madeira de eucalipto para produção de Celulose Kraft. *Revista Árvore*, v. 34, n. 2, p. 339–344, 2010.

GOMIDE, J. L.; GOMES, F. J. B. Polpas químicas para papel. *Branqueamento de Polpa Celulósica*. Viçosa: Editora UFV, 2015. p. 61–115.

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

GONÇALEZ, J. C. *et al.* Relações entre dimensões de fibras e de densidade da madeira ao longo do tronco de *Eucalyptus urograndis*. *Scientia Forestalis*, v. 42, n. 101, p. 81–89, 2014.

GONZAGA, J. V. *Qualidade da madeira e da celulose kraft de treze espécies de Eucalyptus*. 1983. 137 f. 1983. Disponível em: <<http://ir.obihiro.ac.jp/dspace/handle/10322/3933>>.

GONZAGA, J. V. *et al.* Celulose kraft de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus globulus*. 1984, [S.l: s.n.], 1984. p. 11.

GOUVEA, A. F. G. *et al.* Efeito do Sítio nas Características Tecnológicas da Madeira de *Eucalyptus* para Produção de Celulose Kraft. *Revista Ciência da Madeira - RCM*, v. 3, n. 2, p. 102–115, 2012.

GOYAL, G. C. Impact of residual effective alkali (REA) on the bleachability of Kraft hardwood and softwood pulps. 2017, Porto Seguro: [s.n.], 2017.

GRACE, T. M.; AL, E. Chemical reactions of wood constituents. *Alkaline pulping*. [S.l: s.n.], 1989. p. 23–44.

GRUNDELIUS, R. Determining the basic density of wood chips. *Tappi Journal*, v. i, n. April, p. 183–189, 1990.

GUERRA, A. *et al.* Influence of lignin structural features on eucalyptus globulus kraft pulping. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 47, n. 22, p. 8542–8549, 2008.

- GULLICHSEN, J.; KOLEHMAINEN, H. E.; SUNDQVIST, H. On the nonuniformity of the kraft cook. *Paperi Ja Puu – Paper and Timber*, v. 74, n. 6, p. 486–490, 1992.
- GUSTAVSSON, C.; SJÖSTROM, K.; AL-DAJANI, W. The influence of cooking conditions on the bleachability and chemical structure of kraft pulps. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, v. 14, n. 1, p. 71–81, 1999.
- GUTIÉRREZ, A.; ROGRÍGUEZ, I. M.; DEL RIO, J. C. Chemical characterization of lignin and lipid fractions in industrial hemp bast fibers used for manufacturing high-quality paper. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, v. 54, n. 6, p. 2138–2144, 2006.
- HART, P. W.; SANTOS, R. B. Changing the face of short fiber - A review of the eucalyptus revolution. *Tappi Journal*, v. 14, n. 6, p. 353–359, 2015.
- HARWOOD, C. Developing a eucalypt resource: learning from Australia and elsewhere Wood Christchurch. *New introductions - doing it right*. [S.l: s.n.], 2011. p. 125–136.
- HELLSTRÖM, L. *On the wood chipping process – a study on basic mechanisms in order to optimize chip properties for pulping*. 2010. 46 f. 2010.
- HERSCHMILLER, D. W. Kraft cooking with split sulfidity – a way to break the yield barrier? 1998, [S.l: s.n.], 1998.
- IBÁ. *Indústria Brasileira de Árvores*. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2017.
- IBÁ. *Relatório Anual 2020. Indús*. [S.l: s.n.], 2020. Disponível em: <<http://abpa-br.org/relatorios/>>.
- IRVINE, M. G.; CLARK, N. B. Extended delignification of mature and plantation eucalypt wood. 1994, [S.l: s.n.], 1994. p. 61–71.
- JORGE, F.; PEREIRA, H. Influência da silvicultura na qualidade da madeira. *Revista Florestal*, v. 11, n. 2, p. 27–31, 1998.
- JUNIOR, G. DE F. *A história ambiental dos eucaliptos: Austrália, Brasil e Vale do Paraíba Paulista*. [S.l: s.n.], 2014.
- LI, J.; GELLERSTEDT, G. On the structural significance of Kappa number measurement. 1997, [S.l: s.n.], 1997. p. 56–71.
- LIN, S. Y.; DENCE, C. W. *Methods in lignin chemistry*. [S.l: s.n.], 1992.
- LINDGREN, C. T.; LINDSTRÖM, M. E. The kinetics of residual delignification and factors affecting the amount of residual lignin during kraft pulping. *J. Pulp Pap. Sci.*, v. 22, n. 8, p. J290–J295, 1996.
- LOMBARDO, C.; PADILLA, A. Manual teórico práctico de conversión química de la madera y química ambiental. Mérida: Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, p. 55,

1998.

LOPEZ, J.; GOMIDE, J. L.; PHILIPS, R. Influence of eucalyptus wood properties on the financial performance of a modeled Brazilian pulp mill. *O Papel*, v. 70, n. 07, p. 53–71, 2009.

MACLEOD, M. The top ten factors in kraft pulp yield. *Paperi Ja Puu - Paper and Timber*, v. 89, n. 4, p. 3–7, 2007. Disponível em: <http://kraftpulpingcourse.knowledgefirstwebsites.com/f/Top_Ten.pdf>.

MAGATON, A. D. S.; PILÓ-VELOSO, D.; COLODETE, J. L. Characterization of O-acetil-(4-O-methylglucurono)xylans from Eucalyptus urograndis. *Química Nova*, v. 31, n. 5, p. 1085–1088, 2008.

MAGATON, A. DA S. *et al.* Eucalyptus Wood Quality and its Impact on Kraft Pulp Production and Use. *Tappi Journal*, v. 8, p. 32–39, 2009.

MARCOCCIA, B.; PROUGH, J. R.; ENGSTRÖM, J. Continuous cooking. *Papermaking Science and Technology: Chemical pulping*. [S.l.]: Helsinki: Finnish Paper Engineer's Association and TAPPI, 2000. p. 663.

MARCOCCIA, B. S.; LAAKSO, R.; MCCLAIN, G. Lo-Solids pulping: principles and applications. *Tappi Journal*, v. 79, n. 6, p. 179–188, 1996.

MENEGAZZO, M. L. *Características morfológicas de celuloses branqueadas de Pinus e Eucalyptus em analisador óptico automático de fibras*. 2012. 77 f. 2012.

MENESES, V. A. *et al.* Efeito da idade e do sítio na densidade básica e produção de massa seca de madeira em um clone do Eucalyptus urophylla. *Scientia Forestalis*, v. 43, n. 105, p. 101–116, 2015.

MIMMS, A. *et al.* *Kraft pulping: a compilation of notes*. 2. ed. [S.l.]: Tappi, 1993.

MIRANDA, C. R.; BARRICHELO, L. E. G. Celulose de madeira de E. citriodora : influência do tamanho de cavacos. 1990, [S.l: s.n.], 1990. p. 35.

MIYANISHI, T.; SHIMADA, H. Improvement of Pulp Strength and Yield By Computer Simulation of Lo-Solids Kraft Cooking. *Tappi Journal*, v. 84, n. 6, p. 1–22, 2001.

MOKFIENSKI, A; COLODETE, J. Relative importance of wood density and carbohydrate content on pulping yield and product quality. *Ciência Florestal*, v. 18, n. 3, p. 401–413, 2008. Disponível em: <<http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/cienciaflorestal/article/view/451>>.

MOKFIENSKI, ALFREDO *et al.* Importância da Densidade e do Teor de Carboidratos Totais da Madeira de Eucalipto no Desempenho da Linha de Fibra. *Brazil; Laboratório de Celulose e Papel; MG; Universidade Federal de Viçosa; Viçosa*, p. 1–14, 2004. Disponível em: <http://www.eucalyptus.com.br/icep01/alfredo_mokfienski.pdf>.

MOKFIENSKI, ALFREDO. *IMPORTÂNCIA RELATIVA DA DENSIDADE BÁSICA E*

- DA CONSTITUIÇÃO QUÍMICA DE MADEIRA DE *Eucalyptus spp.* NO RENDIMENTO, BRANQUEABILIDADE E QUALIDADE DA POLPA KRAFT. 2004. 153 f. 2004.
- MOLTEBERG, D.; HØIBØ, O. Modelling of wood density and fibre dimensions in mature Norway spruce. *Canada Journal Forest Research*, v. 37, p. 1373–1389, 2007.
- MORAIS, P. H. D. DE *et al.* Influence of clone harvesting age of *Eucalyptus grandis* and hybrids of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* in the wood chemical composition and in kraft pulpability. *Ciência Florestal*, v. 27, n. 1, p. 237–248, 2017.
- MOSCA, Y. *Avaliação da qualidade da madeira de três clones de Eucalyptus, aos cinco anos de idade.* 2010. 39 f. 2010.
- OLIVEIRA, J. T. DA S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. *Revista Árvore*, v. 29, n. 1, p. 115–127, 2006.
- ODIA, A. ET AL. Pyrolysis-GC/MS and TG/ MS study of mediated laccase biodelignification of *Eucalyptus globulus* kraft pulp. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 78, n. 2, p. 233–242, 2007.
- PÁDUA, F. A. *Amostragem para avaliação da densidade básica da madeira de um híbrido de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden x Eucalyptus urophylla S.T. Blake.* 2009. 87 f. 2009.
- PADULA, R. R. *ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DE CAVACOS E DISCOS DE MADEIRA.* 2013. 76 f. 2013.
- PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. *Textbook of wood technology.* McGraw-Hill ed. [S.l.]: McGraw-Hill Book Co., 1980.
- PEDRAZZI, C. *et al.* As xilanas nas propriedades de polpas marrons de eucalipto. *Ciencia Rural*, v. 45, n. 9, p. 1585–1591, 2015.
- PIKKA, O.; ANDRADE, M. A. New developments in pulp mill technology. 2015, [S.l.: s.n.], 2015. p. 13.
- PIMENTEL GOMES, F. *Curso de estatística experimental.* [S.l.: s.n.], 2009.
- QUEIROZ, S. C. S. *et al.* 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. *Revista Árvore*, v. 28, n. 6, p. 901–909, 2004.
- RIBEIRO, R. A.; COLODETTE, J. L.; VAZ JÚNIOR, S. Effect of residual effective alkali on eucalyptus kraft pulp yield and chemistry. *Cerne*, v. 24, n. 4, p. 408–419, 2018.
- ROCHA, M. DAS G. DE B. *et al.* SELEÇÃO DE GENITORES DE *Eucalyptus grandis* E DE *Eucalyptus urophylla* PARA PRODUÇÃO DE HÍBRIDOS INTERESPECÍFICOS UTILIZANDO REML/BLUP E INFORMAÇÃO DE DIVERGÊNCIA GENÉTICA. *Revista*

Árvore, v. 31, n. 6, p. 977–987, 2007.

RUNKEL, R. O. H. Pulp from tropical wood. *Tappi Journal*, v. 35, n. 4, p. 174–178, 1952.

SAMISTARO, G. *et al.* Chemical, anatomical, and technology aspects of *Eucalyptus benthamii* and *Eucalyptus dunii* for use in an integrated pulp and paper mill. *Tappi Journal*, v. 14, n. 2, p. 73–81, 2015.

SAMPAIO, A. . História. *O eucalipto*. [S.l: s.n.], 1961. p. 58–64.

SANI, A.; FOELKEL, C. E. B. *Present status in the utilization of eucalypt wood for pulping in Brazil*. . [S.l: s.n.], 1975.

SANSÍGOLO, C. A.; RAMOS, É. DA S. Quality wood pulp from a clone of *Eucalyptus grandis* planted at three locations. *Cerne*, v. 17, n. 1, p. 47–60, 2011.

SANTAROSA, E.; JÚNIOR, J. F. P.; GOULART, I. C. G. DOS R. *Cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda*. [S.l: s.n.], 2014. Disponível em: <<https://www.embrapa.br>>.

SANTOS, D. R. DE S. *Avaliação tecnológica de clones-élite de Eucalyptus spp ., crescendo no Estado de Goiás : qualidade do lenho para produção de polpa celulósica Kraft*. 2018. 167 f. 2018.

SANTOS, R. B. *Polpação kraft Lo-Solids de cavacos de eucaliptos lixiviados com soluções ácidas*. 2008. 120 f. 2008.

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. *Ciencia Florestal*, v. 17, n. 1, p. 53–63, 2007.

SARTO, C.; SEGURA, T. E. S.; SILVA JÚNIOR, F. G. Performance of *Schizolobium amazonicum* Wood in Bleached Kraft Pulp Production. *BioResources*, v. 10, n. 3, p. 4026–4037, 2015.

SCAN. *SCAN CM 71 - Carbohydrate composition - Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee*. . [S.l: s.n.], 2009

SCOLFORO, J. R. *O mundo do eucalipto: os fatos e mitos de sua cultura*. [S.l: s.n.], 2008.

SEGURA, T. E. S. *Avaliação das madeiras de Corymbia citriodora , Corymbia torelliana e seus híbridos visando à produção de celulose kraft branqueada*. 2015. 198 f. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz- Universidade de São Paulo, 2015.

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. 100 f. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo, 2012.

SEGURA, T. E. S. *et al.* PROGRAMA DE CONTROLE DA QUALIDADE DA MADEIRA NA ELDORADO BRASIL CELULOSE. 2016, [S.l: s.n.], 2016. p. 10.

SEGURA, T. E. S.; SILVA JÚNIOR, F. G. DA. Potential of *C. citriodora* wood species for kraft pulp production. *Tappi Journal*, v. 15, n. 3, p. 159–164, 2016a.

- SEGURA, T. E. S.; SILVA JÚNIOR, F. G. Hybrids of *C. citriodora* and *C. torelliana* for kraft pulp production. 2016b, [S.l: s.n.], 2016. p. 10.
- SETTE JÚNIOR, C. R. *et al.* Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, v. 36, n. 6, p. 1183–1190, 2012.
- SILVA JÚNIOR, F. G. DA; MCDONOUGH, T. J. Polpação Lo-Solids de Eucalipto: Efeito do ritmo de produção. *O Papel*, v. 63, n. 1, p. 69–81, 2002.
- SILVA JÚNIOR, F. G. *Efeito do ritmo de produção sobre a eficiência de processos modificados de polpação para Eucalyptus grandis e Populus tremuloides*. 2005. 157 f. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo, 2005.
- SILVA JÚNIOR, F. G.; BRITO, J. O. Capítulo II- Polpação. *Panorama de la industria de celulosa y papel en Iberoamérica*. [S.l: s.n.], 2008. p. 42.
- SILVÉRIO, F. O. *et al.* Effect of storage time on the composition and content of wood extractives in *Eucalyptus* cultivated in Brazil. *Bioresource Technology*, v. 99, n. 11, p. 4878–4886, 2008.
- SIMETTI, R.; BONDUELLE, G.; DA SILVA, D. Wood quality of five *Eucalyptus* species planted in Rio Grande do Sul, Brazil for charcoal production. *Journal of Tropical Forest Science*, v. 30, n. 2, p. 175–181, 2018.
- SIXTA, H. *Handbook of Pulp*. Austria: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim All, 2008a. v. 1–2.
- SIXTA, H. *Handbook of Pulp Edited by*. [S.l: s.n.], 2008b.
- SJÖDAHL, R. G. *Some Aspects on the Effects of Dissolved Wood Components in Kraft Pulping*. 2006. 1–65 f. 2006.
- SJOSTROM, E. *Wood chemistry: fundamentals and applications*. 2. ed. [S.l.]: Elsevier, 2013.
- SMITH, D. M. *Maximum Moisture Content Method for determining Specific Gravity of Small Wood Samples*. [S.l: s.n.], 1954.
- SMOOK, G. A. *Handbook for pulp & paper technologists*. Angus Wide ed. Vancouver: [s.n.], 1994.
- SOARES, V. C. *et al.* Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. *Cerne*, v. 21, n. 2, p. 191–197, 2015.
- SOUZA, G. B. D. *et al.* Enhancement of eucalypt pulp yield through extended impregnation cooking. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, v. 33, n. 2, p. 175–185, 2018.
- SOUZA, G. S. L. B. EFEITO DA IMPREGNAÇÃO PROLONGADA DOS CAVACOS NO RENDIMENTO E BRANQUEABILIDADE DA POLPA KRAFT DE EUCALITO. 2016. 75 f. 2016.
- TALGATTI, M. *et al.* Caracterização Anatômica De Clones Comerciais De *Eucalyptus* Para a Produção De Papel. *BIOFIX Scientific Journal*, v. 5, n. 1, p. 65–70, 2020.

- TAPPI. *Tests Methods*. . Atlanta: Tappi Press. , 1998
- THOMAZ, C. F. *Caracterização anatômica macroscópica e dimensionamento de fibras de madeiras folhosas com potencial para polpa celulósica*. 2019. 1–34 f. Universidade Federal de Mato Grosso, 2019.
- TRUGILHO, P. F. *et al.* Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. *Ciência Florestal*, v. 45, n. 4, p. 661–666, 2015.
- TRUGILHO, P. F. *et al.* Clones de Eucalyptus versus a produção de polpa celulósica. *Ciência da Madeira - Brazilian Journal of Wood Science*, v. 15, n. 2, p. 145–155, 2005.
- TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da Idade nas Características Físico-Químicas e Anatômicas da Madeira de Eucalyptus saligna. *Revista Cerne*, v. nd., n. nd., p. 1–15, 1996.
- TWADDLE, A. The influence of species, chip length, and ring orientation on chip thickness. *Tappi Journal*, v. 80, p. 123–131, 1997.
- VASCONCELOS, F. S. R. DE. *Avaliação do processo SuperBatchTM de polpação de Pinus taeda*. 2005. 105 f. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz- Universidade de São Paulo, 2005.
- VENTORIM, G.; CARASCHI, J. C. A influência dos ácidos hexenurônicos no rendimento e na branqueabilidade da polpa kraft. *Química Nova*, v. 32, n. 2, p. 373–377, 2009.
- VITAL, B. R. *Métodos de determinação da densidade da madeira*. . [S.l: s.n.], 1984.
- VIVIAN, M. A. *Aumento da eficiência do processo kraft de polpação a partir de pré- tratamento de cavacos de madeira de eucalipto*. 2015. 125 f. 2015.
- WALLIS, A. F. A.; WEARNE, R. .; WRIGHT, P. J. Chemical analysis of polysaccharides in plantation eucalypt woods and pulps. *Appita Journal*, v. 49, n. 4, p. 258–262, 1996.
- WRIGHT, R. Outlook for Market Pulp Report: Demand, Supply, and Prices. p. 48, 2006.
- ZVINAKEVICIUS, C.; FOELKEL, C. E. B.; KATO, J. *Eucalyptus grandis com 5 anos: matéria prima para a indústria de celulose*. . [S.l: s.n.], 1982.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Características meteorológicas dos locais de coleta

Local: Bom Jardim – MA

Material coletado: *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (U x G)

Informações meteorológicas sobre o local de coleta:

Clima: Tropical (Aw)

Altitude: 330 m

Temperatura média anual: 27,3 °C

Pluviosidade média anual: 1793 mm

Figura 26 – Médias mensais de pluviosidade e temperatura de Bom Jardim – MA.

Fonte: Climate Data (2019).

Local: São João do Paraíso – MA

Material coletado: *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus tereticornis* (U x T)

Informações meteorológicas sobre o local de coleta:

Clima: Tropical (Aw)

Altitude: 344 m

Temperatura média anual: 25,1 °C

Pluviosidade média anual: 1435 mm

Figura 27 – Médias mensais de pluviosidade e temperatura para São João do Paraíso – MA.
Fonte: Climate Data (2019).

Local: Lajedão - BA

Material coletado: *Eucalyptus urophylla* (Ur)

Informações meteorológicas sobre o local de coleta:

Clima: Tropical (Aw)

Altitude: 311 m

Temperatura média anual: 23,8 °C

Pluviosidade média anual: 1042 mm

Figura 28 – Médias mensais de pluviosidade e temperatura para Lajedão – BA.
Fonte: Climate Data (2019).

Local: Mucuri - BA

Material coletado: Híbrido de *Eucalyptus grandis* (HGr)

Informações meteorológicas sobre o local de coleta:

Clima: Tropical (Af)

Altitude: 25 m

Temperatura média anual: 24,3 °C

Pluviosidade média anual: 1583 mm

Figura 29 – Médias mensais de pluviosidade e temperatura para Mucuri – BA.
 Fonte: Climate Data (2019).

Local: Agudos - SP

Material coletado: *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (G x U)

Informações meteorológicas sobre o local de coleta:

Clima: Temperado (Cfa)

Altitude: 544 m

Temperatura média anual: 20,6 °C

Pluviosidade média anual: 1237 mm

Figura 30 – Médias mensais de pluviosidade e temperatura para Agudos – SP.
 Fonte: Climate Data (2019).

Local: São Miguel Arcanjo - SP

Material coletado: *Eucalyptus grandis* (Gr)

Informações meteorológicas sobre o local de coleta:

Clima: Temperado (Cfb)

Altitude: 740 m

Temperatura média anual: 18,6 °C

Pluviosidade média anual: 1196 mm

Figura 31 – Médias mensais de pluviosidade e temperatura para São Miguel Arcanjo – SP.
Fonte: Climate Data (2019).

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 250 mL;
6. Adicionar 100 mL 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 250 mL 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:

$$ET (\%) = (1 - ms \text{ serragem}) \cdot 100$$

Em que:

ET (%): extrativos totais (%);

ms serragem: massa da serragem seca já descontando a tara do cadinho (g).

Lignina

13. Pesar 300 mg da serragem livre de extrativos seca e transferir para erlenmeyer de 250 mL;
14. Adicionar 3 mL 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 84 mL 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 700 mL 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 insolúvel através da Equação:

$$LI (\%) = \left(\frac{\frac{MS}{0,3}}{1 - \frac{ET (\%)}{100}} \right) \cdot 100$$

Em que:

LI (%): lignina insolúvel (%);

MS: massa de lignina seca, já descontando a tara do cadinho (g);

ET (%): teor de extrativos totais (%).

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 3 mL 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 215 nm e 280 nm;
26. Prosseguir com a leitura dos filtrados;
27. Calcular os teores de lignina solúvel, lignina total e holocelulose através das Equações:

$$LS = \left(\frac{\frac{4,53 \cdot L_{215}}{0,3}}{300 \cdot \frac{0,3}{1 - \frac{ET(\%)}{100}}} \right) \cdot 100$$

$$LT(\%) = LI(\%) + LS(\%)$$

$$Holo(\%) = 100 - (ET(\%) - LT(\%))$$

Em que:

LS (%): teor de lignina solúvel (%);

L215: leitura da absorbância no comprimento de onda de 215 nm;

L280: leitura de absorbância no comprimento de onda de 280 nm;

ET (%): teor de extrativos totais (%);

LT (%): teor de lignina total (%);

LI (%): teor de lignina insolúvel (%);

Holo (%): teor de holocelulose (%).

APÊNDICE C – Análises de Variância

Tabela 26. Análise de variância para densidade básica ponderada.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,1154	5	0,0231	152,51	0,000
Resíduo	0,0018	12	0,0002		
Total	0,1172	17			

Tabela 27. Análise de variância para densidade básica dos discos nas diferentes posições – *E. urophylla* x *E. terebinthifolius*.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,0026	4	0,0007	2,50	0,109
Resíduo	0,0026	10	0,0003		
Total	0,0052	14			

Tabela 28. Análise de variância para densidade básica dos discos nas diferentes posições – *E. grandis* x *E. urophylla*.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,0011	4	0,0003	1,24	0,356
Resíduo	0,0023	10	0,0002		
Total	0,0034	14			

Tabela 29. Análise de variância para densidade básica dos discos nas diferentes posições – *E. urophylla* x *E. grandis*.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,0012	4	0,0003	2,02	0,168
Resíduo	0,0015	10	0,0002		
Total	0,0027	14			

Tabela 30. Análise de variância para densidade básica dos discos nas diferentes posições – *E. urophylla*.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,0000	4	0,0002	0,64	0,646
Resíduo	0,0038	10	0,0004		
Total	0,0048	14			

Tabela 31. Análise de variância para densidade básica dos discos nas diferentes posições – *E. grandis* (híbrido).

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,003	4	0,0007	5,57	0,013
Resíduo	0,001	10	0,0001		
Total	0,004	14			

Tabela 32. Análise de variância para densidade básica de cavacos.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,1150	5	0,0230	400,48	0,000
Resíduo	0,0014	24	0,0001		
Total	0,1164	29			

Tabela 33. Análise de variância – Regressão densidade básica dos cavacos x densidade básica dos discos.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,114	1	0,114	577,79	0,000
Resíduo	0,00316	16	0,000197		
Total	0,117	17			

Tabela 34. Análise de variância para teor de extrativos totais.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	18,2723	5	3,6545	42,93	0,000
Resíduo	1,0215	12	0,0851		
Total	19,2938	17			

Tabela 35. Análise de variância para teor de lignina total.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	11,0391	5	2,2078	9,56	0,001
Resíduo	2,7723	12	0,2310		
Total	13,8114	17			

Tabela 36. Análise de variância para teor de holocelulose.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	24,6208	5	4,9242	19,65	0,000
Resíduo	3,0064	12	0,2505		
Total	27,6272	17			

Tabela 37. Análise de variância para teor de cinzas.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,2497	5	0,0499	30,48	0,000
Resíduo	0,0197	12	0,0016		
Total	0,2694	17			

Tabela 38. Análise de variância para comprimento das fibras.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	2,0623	5	0,4125	22,2	0,000
Resíduo	11,0344	594	0,0186		
Total	13,0967	599			

Tabela 39. Análise de variância para largura das fibras.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	1255,5100	5	251,1020	22,74	0,000
Resíduo	6558,2900	594	11,0409		
Total	7813,8000	599			

Tabela 40. Análise de variância para diâmetro do lúme das fibras.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	2789,4300	5	557,8850	90,31	0,000
Resíduo	3669,2200	594	6,1771		
Total	6458,6500	599			

Tabela 41. Análise de variância para espessura de parede das fibras.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	180,9180	5	36,1836	43,69	0,000
Resíduo	491,9760	594	0,8282		
Total	672,8940	599			

Tabela 42. Análise de variância – Regressão densidade básica x largura das fibras.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	1290000	1,0000	1290000	73,71	0,000
Resíduo	10400000	598	17500		
Total	11700000	599			

Tabela 43. Análise de variância – Regressão densidade básica x diâmetro do lúme.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,342	1	0,342	515,99	0,000
Resíduo	0,397	598	0,000663		
Total	0,739	599			

Tabela 44. Análise de variância – Regressão densidade básica x fração parede.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	352000000	1	352000000	853,5	0,000
Resíduo	247000000	598	412000		
Total	599000000	599			

Tabela 45. Análise de variância para número kappa – processo convencional.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,92444	5	0,18489	0,79	0,576
Resíduo	2,80667	12	0,23389		
Total	3,73111	17			

Tabela 46. Análise de variância para número kappa – processo estendido.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,704	5	0,141	2,76	0,070
Resíduo	0,613	12	0,0511		
Total	1,32	17			

Tabela 47. Análise de variância para álcali efetivo residual – processo convencional.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	10,5	5	2,09	3,18	0,056
Resíduo	7,9	12	0,658		
Total	18,4	17			

Tabela 48. Análise de variância para álcali efetivo residual – processo estendido.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	14,3	5	2,86	2,12	0,090
Resíduo	40,5	30	1,35		
Total	54,8	35			

Tabela 49. Análise de variância para fator H – processo convencional.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	308000,0	5,0	61700,0	510,2	0,000
Resíduo	1450,0	12,0	121,0		
Total	310000,0	17,0			

Tabela 50. Análise de variância para fator H – processo estendido.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	36700,00	5,00	7330,00	463,05	0,000
Resíduo	190,00	12,00	15,80		
Total	36800,00	17,00			

Tabela 51. Análise de variância para rendimento bruto – processo convencional.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	164	5	32,8	140,96	0,000
Resíduo	2,79	12	0,233		
Total	167	17			

Tabela 52. Análise de variância para rendimento bruto – processo estendido.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	105	5	21	50,42	0,000
Resíduo	5	12	0,417		
Total	110	17			

Tabela 53. Análise de variância para rendimento depurado – processo convencional.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	160	5	32,1	145,11	0,000
Resíduo	2,65	12	0,221		
Total	163	17			

Tabela 54. Análise de variância para rendimento depurado – processo estendido.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	104	5	20,9	46,61	0,000
Resíduo	5,37	12	0,448		
Total	110	17			

Tabela 55. Análise de variância para teor de rejeitos – processo convencional.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,104	5,000	0,021	6,270	0,004
Resíduo	0,040	12,000	0,003		
Total	0,144	17,000			

Tabela 56. Análise de variância para teor de rejeitos – processo estendido.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,0583	5	0,0117	2,1	0,1357
Resíduo	0,0667	12	0,00556		
Total	0,125	17			

Tabela 57. Análise de variância para consumo específico de madeira – processo convencional.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	2,9	5	0,579	413,91	0,000
Resíduo	0,0168	12	0,0014		
Total	2,91	17			

Tabela 58. Análise de variância para consumo específico de madeira – processo estendido.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	2,43	5	0,487	200,03	0,000
Resíduo	0,0292	12	0,00243		
Total	2,46	17			

Tabela 59. Análise de variância para viscosidade – processo convencional.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	300000,00	5	60100,00	68	0,000
Resíduo	10600,00	12	883		
Total	311000,00	17			

Tabela 60. Análise de variância para viscosidade – processo estendido.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	194000,00	5	38700,00	25,02	0,000
Resíduo	18600,00	12	1550,00		
Total	212000,00	17			

Tabela 61. Análise de variância para ácidos hexenurônicos – processo convencional.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	222	5	44,4	16,42	0,000
Resíduo	32,5	12	2,71		
Total	255	17			

Tabela 62. Análise de variância para ácidos hexenurônicos – processo estendido.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	139	5	27,8	9,39	0,001
Resíduo	35,5	12	2,96		
Total	175	17			

Tabela 63. Análise de variância para número kappa corrigido – processo convencional.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	2,35	5	0,471	1,52	0,257
Resíduo	3,73	12	0,311		
Total	6,08	17			

Tabela 64. Análise de variância para número kappa corrigido – processo estendido.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	2,56	5	0,513	6,24	0,005
Resíduo	0,987	12	0,0822		
Total	3,55	17			

Tabela 65. Análise de variância para teor de sólidos totais – processo convencional.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	28,2	5	5,63	5,72	0,006
Resíduo	11,8	12	0,986		
Total	40	17			

Tabela 66. Análise de variância para teor de sólidos totais – processo estendido.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	10,3	5	2,06	3,39	0,039
Resíduo	7,3	12	0,608		
Total	17,6	17			

Tabela 67. Análise de variância para teor de sólidos orgânicos – processo convencional.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	10,9	5,0	2,2	4,4	0,016
Resíduo	5,9	12,0	0,5		
Total	16,8	17,0			

Tabela 68. Análise de variância para teor de sólidos orgânicos – processo estendido.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	2,45	5	0,491	2,08	0,138
Resíduo	2,83	12	0,236		
Total	5,28	17			

Tabela 69. Análise de variância para teor de sólidos inorgânicos – processo convencional.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	4,59	5	0,918	8,52	0,001
Resíduo	1,29	12	0,108		
Total	5,88	17			

Tabela 70. Análise de variância para teor de sólidos inorgânicos – processo estendido.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	3,37	5	0,674	6,19	0,005
Resíduo	1,31	12	0,109		
Total	4,68	17			

Tabela 71. Análise de variância para teor de sólidos gerados – processo convencional.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,533	5	0,107	234,66	0,000
Resíduo	0,00545	12	0,00045		
Total	0,539	17			

Tabela 72. Análise de variância para teor de sólidos gerados – processo estendido.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,283	5	0,0565	72,59	0,000
Resíduo	0,00935	12	0,00078		
Total	0,292	17			

Tabela 73. Análise de variância para álcali ativo consumido – processo convencional.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	80,3	5	16,1	11,25	0,000
Resíduo	17,1	12	1,43		
Total	97,4	17			

Tabela 74. Análise de variância para álcali ativo consumido – processo estendido.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	59,5	5	11,9	5,26	0,009
Resíduo	27,1	12	2,26		
Total	86,6	17			

Tabela 75. Análise de variância para álcali ativo consumido por tonelada produzida – processo convencional.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	13400,00	5	2690,00	37,33	0,000
Resíduo	864,00	12	72		
Total	14300,00	17			

Tabela 76. Análise de variância para álcali ativo consumido por tonelada produzida – processo estendido.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	7190,0	5	1440,0	14,07	0,000
Resíduo	1230,0	12	102,0		
Total	8410,0	17			

Tabela 77. Análise de variância – Regressão teor de extrativos x álcali ativo (convencional).

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,000	1	0,000	31,040	0,000
Resíduo	0,000	16	0,000		
Total	0,000	17			

Tabela 78. Análise de variância – Regressão teor de extrativos x álcali ativo (estendido).

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,000157	1	0,00	18,88	0,001
Resíduo	0,000133	16	0,00		
Total	0,000289	17			

Tabela 79. Análise de variância – Regressão teor de celulose x álcali ativo (convencional).

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	61,4	1	61,4	187,24	0,000
Resíduo	5,24	16	0,328		
Total	66,6	17			

Tabela 80. Análise de variância – Regressão teor de celulose x álcali ativo (estendido).

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	66200,00	1	66200,00	54,17	0,000
Resíduo	19500,00	16	1220,00		
Total	85700,00	17			

Tabela 81. Análise de variância – Regressão rendimento depurado – C x rendimento depurado – E

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	103	1	103	238,99	0,000
Resíduo	6,89	16	0,43		
Total	110	17			

Tabela 82. Análise de variância – Regressão densidade básica x rendimento depurado (convencional).

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	373000	1	373000	5,01	0,040
Resíduo	1190000	16	74500		
Total	1560000	17			

Tabela 83. Análise de variância – Regressão densidade básica x rendimento depurado (estendido).

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	299000	1	299000	5,42	0,033
Resíduo	883000	16	55200		
Total	1180000	17			

Tabela 84. Análise de variância – Regressão teor de extrativos x rendimento depurado (convencional).

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	1090000	1	1090000	36,66	0,000
Resíduo	475000	16	29700		
Total	1560000	17			

Tabela 85. Análise de variância – Regressão teor de extrativos x rendimento depurado (estendido).

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	849000	1	849000	40,7	0,000
Resíduo	334000	16	20900		
Total	1180000	17			

Tabela 86. Análise de variância – Regressão teor de celulose x rendimento depurado (convencional).

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,00	1	0,00	68,85	0,000
Resíduo	0,00	16	0,00		
Total	0,00	17			

Tabela 87. Análise de variância – Regressão teor de celulose x rendimento depurado (estendido).

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,00	1	0,00	35,41	0,000
Resíduo	0,00	16	0,00		
Total	0,00	17			

Tabela 88. Análise de variância – Regressão relação S/G x rendimento depurado (convencional).

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	1250000	1	1250000	63,16	0,000
Resíduo	316000	16	19800		
Total	1560000	17			

Tabela 89. Análise de variância – Regressão relação S/G x rendimento depurado (estendido).

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	796000	1	796000	32,94	0,000
Resíduo	387000	16	24200		
Total	1180000	17			

Tabela 90. Análise de variância – Regressão densidade básica x consumo específico de madeira (convencional).

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,0584	1	0,058	59,08	0,000
Resíduo	0,0158	16	0,001		
Total	0,0742	17			

Tabela 91. Análise de variância – Regressão densidade básica x consumo específico de madeira (estendido).

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,0601	1	0,0601	105,43	0,000
Resíduo	0,00912	16	0,00057		
Total	0,0692	17			

Tabela 92. Análise de variância – Regressão fator H x viscosidade (convencional).

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	655000000000	1,0	655000000000	63,2	0,000
Resíduo	166000000000	16,0	10400000000		
Total	820000000000	17,0			

Tabela 93. Análise de variância – Regressão fator H x viscosidade (estendido).

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,000	1	0,000	29,96	0,000
Resíduo	0,000	16	0,000		
Total	0,000	17			

Tabela 94. Análise de variância – Regressão rendimento depurado x viscosidade (convencional).

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	0,00	1	0,00	169,56	0,000
Resíduo	0,00	16	0,00		
Total	0,00	17			

Tabela 95. Análise de variância – Regressão rendimento depurado x viscosidade (estendido).

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	P-valor
Tratamentos	40,5	1	40,5	70,8	0,000
Resíduo	9,16	16	0,573		
Total	49,7	17			