

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

**DIMENSÕES DE CAVACOS INDUSTRIAIS DE EUCALIPTO E  
RELAÇÕES COM POLPAÇÃO, RESISTÊNCIA E MORFOLOGIA DE  
FIBRAS NA POLPA**

**João Paulo Grande**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Ciência Florestal.

BOTUCATU-SP  
Outubro – 2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

**DIMENSÕES DE CAVACOS INDUSTRIAIS DE EUCALIPTO E  
RELAÇÕES COM POLPAÇÃO, RESISTÊNCIA E MORFOLOGIA DE  
FIBRAS NA POLPA**

**João Paulo Grande**

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Angeli Sansígolo

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Ciência Florestal.

BOTUCATU-SP  
Outubro - 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO -  
SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA  
- LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Grande, João Paulo, 1980-  
G751d      Dimensões de cavacos industriais de eucalipto e relações com polpação,  
resistência e morfologia de fibras na polpa / João Paulo Grande. - Botucatu:  
[s.n.], 2012  
viii, 77 f. : gráfs., tabs., fots. color.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual  
Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu,  
2012  
Orientador: Cláudio Angeli Sansígolo  
Inclui bibliografia

1. Cavacos. 2. Celulose. 3. Dimensões. 4. Polpação. 5. Resíduos de  
madeiras. I. Sansígolo, Cláudio Angeli. II. Universidade Estadual Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências  
Agrônomicas. III. Título.

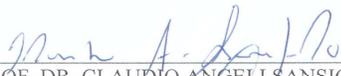
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU  
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

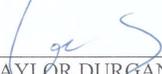
TÍTULO: "DIMENSÕES DE CAVACOS INDUSTRIAIS DE EUCALIPTO E  
RELAÇÕES COM POLPAÇÃO, RESISTÊNCIA E MORFOLOGIA DE  
FIBRAS NA POLPA"

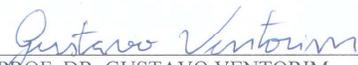
ALUNO: JOÃO PAULO GRANDE

ORIENTADOR: PROF. DR. CLAUDIO ANGELI SANSIGOLO

Aprovado pela Comissão Examinadora

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. CLAUDIO ANGELI SANSIGOLO

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. ELIAS TAYLOR DURGANTE SEVERO

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. GUSTAVO VENTORIM

Data da Realização: 15 de agosto 2012.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida e pela capacidade para concluir o curso de pós-graduação.

Ao professor Dr. Cláudio Angeli Sansígolo pela confiança depositada.

Aos professores Dr. Elias Taylor Durgante Severo e Dr. Gustavo Ventorim pelas sugestões que contribuíram para enriquecer o trabalho.

A Universidade Estadual Paulista (UNESP), aos funcionários do Departamento de Recursos Naturais, especialmente aos técnicos dos laboratórios de química da madeira e celulose e papel.

A minha esposa pelo fundamental apoio durante todo o tempo.

A FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pela concessão da bolsa, a qual foi muito importante para realização do trabalho.

## SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	03
1.1 Objetivos.....	05
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	06
2.1 O eucalipto.....	06
2.2 A celulose de eucalipto.....	07
2.3 Anatomia da madeira.....	09
2.4 Composição química da madeira.....	11
2.4.1 Celulose.....	12
2.4.2 Hemiceluloses.....	13
2.4.3 Lignina.....	13
2.4.4 Extrativos.....	14
2.5 Teor de umidade da madeira.....	14
2.6 Densidade básica da madeira.....	16
2.7 Picagem da madeira.....	18
2.8 Dimensões dos cavacos.....	20
2.9 Polpação Kraft.....	22
2.10 Impregnação dos cavacos.....	23
2.11 Qualidade das fibras.....	26
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1 Material.....	27
3.2 Métodos.....	28
3.2.1 Classificação da amostra.....	28
3.2.2 Determinação do teor de umidade dos cavacos.....	29

3.2.3	Determinação das massas e dimensões dos cavacos.....	30
3.2.4	Determinação da densidade a granel dos cavacos.....	31
3.2.5	Determinação da densidade básica dos cavacos.....	32
3.2.6	Determinação da composição química dos cavacos.. ..	33
3.2.6.1	Preparação dos cavacos para análises químicas.....	33
3.2.6.2	Solubilidade em hidróxido de sódio (NaOH) 1%.....	33
3.2.6.3	Determinação do teor de lignina insolúvel em ácido.....	34
3.2.6.4	Determinação do teor holocelulose.....	35
3.2.6.5	Determinação do teor cinzas.....	36
3.2.7	Polpação Kraft.....	37
3.2.7.1	Rendimento Bruto.....	37
3.2.7.2	Teor de rejeitos e rendimento depurado.....	38
3.2.7.3	Determinação do número Kappa.....	39
3.2.8	Determinação do consumo específico de madeira.....	40
3.2.9	Classificação das fibras e propriedades físico-mecânicas da celulose.....	40
3.2.9.1	Classificação das fibras de celulose.....	40
3.2.9.2	Propriedades físico-mecânicas da celulose.....	41
3.2.10	Delineamento experimental.....	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1	Massa dos cavacos.....	46
4.2	Dimensões dos cavacos.....	47
4.2.1	Estatística descritiva.....	47
4.2.2	Médias das dimensões.....	52
4.3	Densidade a granel dos cavacos.....	54

4.4 Relações entre as dimensões dos cavacos.....	55
4.5 Densidade básica dos cavacos.....	57
4.6 Composição química dos cavacos.....	60
4.7 Polpação Kraft.....	62
4.8 Classificação das fibras.....	66
4.9 Caracterização físico-mecânica da celulose.....	67
5 CONCLUSÕES.....	70
6 REFERÊNCIAS .....	72

**LISTA DE TABELAS**

	Página
Tabela 1 - Dados técnicos do picador de toretes industrial.....	28
Tabela 2 - Dados técnicos do classificador industrial.....	28
Tabela 3 - Dimensões médias dos tratamentos.....	29
Tabela 4 - Massa e percentagem das frações de cavacos.....	46
Tabela 5 - Resumo da análise estatística descritiva das dimensões dos cavacos.....	49
Tabela 6 - Densidade básica individual e porosidade dos cavacos.....	58
Tabela 7 - Composição química dos cavacos.....	61
Tabela 8 - Rendimento do cozimento dos cavacos.....	67
Tabela 9 - Comprimento das fibras na celulose dos cavacos.....	67
Tabela 10 – Propriedades da polpa refinada em moinho Jokro a 7000 revoluções.....	69

**LISTA DE FIGURAS**

	Página
Figura 1 - Dimensões do cavaco.....	31
Figura 2 - Distribuição da frequência relativa e frequência acumulada das dimensões dos cavacos das frações e controle.....	51
Figura 3 - Médias do comprimento, largura e espessura dos cavacos dos tratamentos.....	52
Figura 4 - Densidade a granel dos cavacos das frações e controle.....	55
Figura 5 - Relação comprimento/largura e relação comprimento/espessura dos cavacos das frações e controle.....	56
Figura 6 - Densidade básica e densidade básica individual dos cavacos das frações e controle.....	58
Figura 7 - Rendimento bruto e rendimento depurado dos cavacos das frações controle.....	63
Figura 8 - Rejeitos base madeira e base celulose dos cavacos das frações e controle.....	64
Figura 9 – Número Kappa e consumo específico da madeira dos cavacos das frações e controle.....	65

## RESUMO

A celulose de fibra curta branqueada produzida no Brasil é toda proveniente de madeira de florestas de *Eucalyptus* spp. A qualidade dos cavacos usados na produção de celulose é considerada um fator importante para operabilidade da indústria e para a qualidade da polpa. Os cavacos desejáveis são aqueles que apresentam poucas variações nas características físicas e químicas, isentos de contaminantes, alta densidade a granel, impregnação homogênea, baixa degradação de polissacarídeos e alto rendimento na transformação em polpa celulósica. Na indústria a classificação do tamanho dos cavacos passou a ser adotada depois que estudos demonstraram que os cavacos muito grandes e/ou muito pequenos poderiam interferir no processo de deslignificação e na qualidade da polpa celulósica, mas os cavacos utilizados pela indústria ainda apresentam variações no tamanho depois da classificação industrial. O objetivo do estudo foi identificar nos cavacos classificados industrialmente, dimensões que favoreçam ou desfavoreçam o processo de deslignificação e a resistência da polpa. Para tanto, foi coletada uma amostra de cavacos em uma indústria de celulose, a amostra foi separada em sete frações, e mensurada às dimensões (comprimento, largura e espessura), determinado à densidade básica, densidade a granel, e composição química dos cavacos. As frações também foram deslignificadas e determinado o rendimento bruto, rendimento depurado, rejeitos base celulose, rejeitos base madeira e o número Kappa da polpa marrom. As fibras dos cavacos grande e pequenos foram classificadas pelo comprimento, e determinado algumas características físico-mecânicas da celulose. As dimensões dos cavacos variaram entre as frações, houve aumento do teor de holocelulose nas duas frações com as menores dimensões dos cavacos. O rendimento bruto e depurado, e o teor de rejeitos base celulose, não diferiram significativamente, mas houve tendência de redução do teor de rejeitos e do número Kappa e aumento do consumo específico de madeira com a diminuição do tamanho das dimensões dos cavacos. O comprimento das fibras não apresentou diferenças significativas entre os cavacos grandes e pequenos, e nos testes de resistência da celulose observou-se que a celulose produzida com cavacos pequenos apresentou maior grau Shopper Riegler, resistência ao ar, e menor volume específico aparente.

---

Palavras-chave: cavacos, dimensões, polpação e celulose.

DIMENSIONS OF INDUSTRIAL EUCALYPTUS CHIPS AND RELATIONS WITH PULPING, RESISTANCE AND MORPHOLOGY OF THE PULP FIBERS. Botucatu, 2012. 77 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal/Tecnologia da Madeira) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: João Paulo Grande

Adviser: Cláudio Angeli Sansígolo

## SUMMARY

Bleached hardwood pulp produced in Brazil is entirely from wood of *Eucalyptus spp* forests. The quality of the chips used in pulp production is considered an important factor in the industry operability and the pulp quality. Desirable chips have few variations of physical and chemical characteristics are free of contaminants, and present high bulk density, homogeneous uptake, low degradation of polysaccharides and high milling yield in kraft pulp. In manufacturing, the chip size classification has been adopted after studies have shown that very large and / or very little chips could interfere in the delignification process and pulp quality; however, the chips used by the industry still vary in size after industrial grading. The aim of this study was to identify, among the industrially classified chips, dimensions that favor or not the delignification process and pulp strength. Thus, a chip sample was collected in a pulp mill, then the chips were separated into seven fractions and their dimensions (length, width and thickness) were measured, and the chip basic density, bulk density, chemical composition were determined. The chips were also delignified, and the total yield, screening yield, pulp-based wastes, wood- based wastes, and Kappa number of unbleached pulp were determined. The fibers of large and small chips were classified by length, and some physical and mechanical properties of cellulose were determined. The chip dimensions varied among fractions, and there was an increase of holocellulose content in the two fractions that had the smallest chips. The total yield, screening yield, and pulp-based waste content did not differ significantly, but, when the chip size dimension decreased, the waste content and kappa number were likely to reduce and the specific wood use was likely to increase. The fiber length showed no significant differences between large and small chips, and in cellulose resistance tests, it was observed that the cellulose produced with small chips showed greater Shopper Riegler degree and air resistance, and lower apparent specific volume.

Key words: chip dimensions, pulping and pulp.

## 1 INTRODUÇÃO

Nas duas últimas décadas a produção e a exportação de celulose química branqueada aumentaram consideravelmente, em 1991 a produção brasileira foi de 2,8 milhões de toneladas, em 2010 o país produziu 11,5 milhões de toneladas, e aproximadamente 60% foi exportada (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 2010).

O aumento das exportações da celulose brasileira ocorreu por conta da boa qualidade, preço internacionalmente competitivo, privilegiadas condições edafoclimáticas, e também pela implantação de inovações tecnológicas, as quais aumentaram a produtividade florestal e o desempenho industrial.

Na floresta, o melhoramento genético continua como a principal ferramenta para aumentar a produtividade das florestas, através da seleção de indivíduos mais produtivos, e com melhores características físicas e químicas da madeira. Na indústria, a modernização, automação e a adoção de processos modificados aumentaram a eficiência, e proporcionaram maior agilidade na produção.

Esses importantes avanços contribuíram para reduzir os custos de produção da celulose brasileira, contudo, não aumentaram significativamente o rendimento do processo químico de transformação da madeira em celulose. O rendimento médio obtido pela indústria encontra-se em torno de 50%, mesmo apesar da grande modernização dos equipamentos e processos. Em trabalhos científicos o rendimento varia de 49% a 57%, os mais altos são conseguidos em cozimentos com madeira de espécies com baixos teores de lignina.

Na indústria a matéria-prima passa por diversos processos até ser transformada em celulose, a primeira operação é a picagem, ela consiste na redução dos toretes em pequenos fragmentos de madeira chamados de cavacos. A picagem das toras é realizada em picadores, esses equipamentos picam grandes volumes de madeira e apresentam altos desempenhos, no entanto, não são capazes de produzir cavacos com dimensões idênticas.

A ocorrência de variações no tamanho dos cavacos é inevitável, entretanto, variações muito grandes podem ser minimizadas através da afiação periódica das facas de corte, e com mudanças da configuração do corte em função das alterações da qualidade da madeira.

A variação no tamanho dos cavacos é facilmente vista nos pátios de armazenamento, de maneira geral, ela acontece pela desuniformidade natural da madeira, e impossibilidade de alterar a configuração do picador simultaneamente com as variações da madeira. Portanto, os cavacos são classificados em peneiras antes de entrarem no processo de cozimento, com objetivo de separar os cavacos muito grandes e os muito pequenos, porque eles podem dificultar a operacionalização, aumentar o teor de rejeitos e reduzir a uniformidade da polpa.

A classificação industrial dos cavacos pode ser feita por diferentes equipamentos, o modelo mais comum possui um conjunto de duas ou mais peneiras sobrepostas, com orifícios redondos e ou retangulares que diminuem de tamanho da peneira superior para a inferior. Os cavacos retidos na primeira peneira podem ser repicados e novamente classificados, aqueles que passam pela última peneira são muito pequenos e considerados matéria-prima perdida.

Os cavacos passaram a ser classificados depois que pesquisas demonstraram que os cavacos muito grandes e muito pequenos poderiam interferir no rendimento e na qualidade da polpa de celulose. Os cavacos apresentam três dimensões básicas: comprimento largura e espessura, essa última é a menor delas, porém considerada a mais importante para a impregnação dos cavacos.

No cozimento os cavacos são impregnados com uma solução de reagentes (licor branco), que agem degradando a lignina e liberando as fibras, o licor de cozimento deve penetrar e alcançar o centro do cavaco simultaneamente nas três dimensões, caso esse fenômeno não ocorra, os cavacos não serão suficientemente impregnados pelo licor, e conseqüentemente a região central ficará mal cozida, ou seja, grande parte da lignina continuará nas fibras e essa parte será separada e perdida como rejeito.

O processo químico mais utilizado na produção de celulose branqueada de *Eucalyptus spp* é o Kraft, ele consiste em acondicionar os cavacos juntamente com o licor de cozimento, solução de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na<sub>2</sub>S), em um reator sob pressão, onde os cavacos são impregnados pela solução, e em seguida aquecidos para facilitar a reação do licor com a lignina e individualizar as fibras.

Uma das frentes das pesquisas para tentar melhorar o rendimento de madeira em celulose é o estudo da influência da dimensão dos cavacos sobre o rendimento e a qualidade da polpa. Os trabalhos nessa temática são antigos e recorrentes ao longo do tempo, demonstrando que o estudo da dimensão dos cavacos e a relação com as demais variáveis do processo de cozimento, podem contribuir para melhorar a eficiência do processo de produção de celulose.

Este trabalho estudou cavacos picados e classificados industrialmente. Os cavacos coletados foram reclassificados manualmente por tamanho, com o objetivo de formar seis frações mais homogêneas possíveis, também foram separados todos os cavacos de madeira com nó da amostra. De cada fração foram amostrados 300 cavacos aleatoriamente para medir o comprimento, largura e espessura, e também foram determinadas algumas características físicas e químicas. Os cavacos foram submetidos à deslignificação Kraft visando determinar rendimento bruto e depurado, teor de rejeitos e o número Kappa da celulose de cada fração, bem como foram realizados testes físico-mecânico na celulose produzida.

## 1.1 Objetivos

O objetivo do trabalho foi estudar nos cavacos picados e classificados industrialmente frações que possam favorecer ou desfavorecer as suas qualidades (propriedades físicas e químicas da madeira) para polpação, o processo químico Kraft de deslignificação e a qualidade da celulose. Os objetivos específicos foram os seguintes:

- Analisar as influências das dimensões das frações dos cavacos classificados e dos cavacos com nós nas propriedades físicas e químicas;
- Estudar a influência das dimensões dos cavacos e cavacos com nós nos rendimentos e deslignificação no processo de polpação Kraft;
- Analisar as propriedades físico-mecânicas da celulose provenientes de cavacos grandes, pequenos e integrais.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 O eucalipto

O gênero *Eucalyptus* conta com quase 600 espécies e a maioria delas são originárias da Austrália. As florestas nativas de *Eucalyptus* encontram-se ao longo da costa e também em regiões do interior do continente Australiano, apenas duas espécies não são naturais da Austrália, o *Eucalyptus urophylla* que é originário do Timor e das ilhas próximas à Indonésia, e o *Eucalyptus deglupta* que tem origem na Nova Guiné e no sul das Filipinas (DOUGHT, 2000).

O eucalipto pertence à família das Mirtáceas, seu nome deriva do grego: eu (= bem) e kalipto (=cobrir), pelo fato dos seus frutos possuírem uma tampa com formato globular arredondada que protege as sementes. Este gênero apresenta espécies que atingem alturas gigantescas, outras com porte mediano e também espécies arbustivas (ANDRADE, 1961; MARTINI, 2004).

A semente de eucalipto começou a ser distribuída pelo planeta a partir da primeira remessa enviada para França em 1804. Estima-se que os primeiros plantios de eucaliptos no Brasil ocorreram entre 1855 e 1870 (PENFOLD et al., 1961).

No Brasil o eucalipto foi plantado como árvore ornamental e quebra-vento até o início do século XX. A Companhia Paulista de Estradas de Ferro iniciou os estudos experimentais com plantas de eucaliptos no ano de 1903, na cidade paulista de Jundiaí, com objetivo de produzir madeira para suprir a demanda crescente da empresa por lenha e dormentes (ANDRADE, 1961).

Navarro de Andrade foi quem comandou os estudos para a Cia., ele testou centenas de espécies de eucalipto e também nativas. As experiências levaram Navarro de Andrade a concluir que algumas espécies do gênero *Eucalyptus spp* eram as melhores opções para o cultivo e produção de madeira em larga escala, devido à alta produtividade e boa qualidade da madeira. A Cia. Adquiriu 18 propriedades cuja área somada era de aproximadamente 26.000 hectares, dos quais 60% foram ocupados com o plantio de eucalipto. A madeira produzida foi utilizada para suprir grande parte da demanda da empresa (PENFOLD et al., 1961; MARTINI, 2004).

Martini (2004, p. 66) descreve: “A Companhia Paulista de Estrada de Ferro também incentivou o plantio de eucaliptais em fazendas particulares ao longo de suas linhas, fazendo com que em curto prazo, o consumo de lenha de árvores nativas torna-se praticamente nulo [...]”.

Além das pesquisas para selecionar plantas e manejos adequados para a Cia, Navarro de Andrade também acreditava na aptidão da madeira de eucalipto para produção de móveis e para produção de polpa e papel.

Em 1925 Navarro de Andrade foi aos Estados Unidos da America, e levou consigo quatro toras de eucaliptos, duas de *E. saligna* e duas de *E. teriticornis*, com o objetivo de produzir polpa e papéis com a madeira. As experiências foram realizadas no Forest Products Laboratory, em Madison, Winsconsin, e foram fabricados diversos tipos de papéis de boa qualidade (ANDRADE, 1961, p. 17).

O trabalho desenvolvido por Navarro de Andrade com o eucalipto ficou conhecido internacionalmente, e no ano de 1941 a Associação Americana de Genética, homenageou-lhe com a entrega da “Medalha Meyer” pela importância dos trabalhos de introdução e aclimação da cultura do eucalipto no Brasil (MARTINI, 2004).

## 2.2 A celulose de eucalipto

A produção de celulose a partir da madeira de eucalipto foi considerada impossível durante muito tempo. A quebra desse paradigma foi uma vitória dos químicos australianos depois de anos de pesquisas. A produção australiana iniciou em 1922 com uma fábrica piloto, mas a primeira fábrica em escala comercial foi fundada na Tasmânia em 1938, com objetivo de produzir polpa de eucalipto pelo processo soda para fabricação de papéis para escrever (PENFOLD et al., 1961).

No Brasil os primeiros testes e ensaios para produção de polpa de eucalipto foram feitos por Navarro de Andrade. A primeira empresa a produzir polpa sulfito de eucalipto foi a Gordinho Braune & Cia. em 1927, a polpação sulfito usava reagentes ácidos e altas temperaturas para separar as fibras e dissolver a lignina, mas o rendimento do processo era baixo (DOUGHT, 2000).

A indústria brasileira de celulose e papel começou a se desenvolver devido à crescente demanda do país por papel e o aumento da dependência das importações. A princípio, a celulose foi produzida a partir da madeira de uma espécie nativa endêmica da região Sul do país, o Pinheiro do Paraná (*Araucaria angustifolia*), e de matérias primas não madeira. No ano de 1953 os técnicos da S/A Indústrias Reunidas Francisco Matarazzo conseguiram produzir papel sulfite com gramatura de  $60\text{g m}^{-2}$  apenas com polpa de celulose de eucalipto (JUVENAL et al., 2002).

No ano de 1950, duas fábricas, uma Norte Americana e outra Canadense, produziram 20 toneladas de papel jornal pelo processo soda a frio, usando madeira de *Eucalyptus saligna* plantado pela Companhia Paulista de Estradas de Ferro, parte do papel produzido foi utilizado na impressão do Jornal Estado de São Paulo de 27 de maio de 1956 (DOUGHT, 2000).

Em 1957 o Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES) aprovou o primeiro apoio financeiro para um projeto que envolvia o plantio de eucalipto, e o uso da madeira para produção de celulose. A indústria de celulose e papel teve como alicerce do seu primeiro grande aumento da produção, os incentivos governamentais das décadas de 1960 e 1970 (JUVENAL et al., 2002).

Em 1961 aconteceu em São Paulo à segunda conferência mundial sobre o Eucalipto, alguns dos temas discutidos foram às vantagens da polpa e do papel produzidos a partir da madeira de eucalipto, e os métodos de deslignificação soda a frio e Kraft. No processo soda a frio, a madeira era impregnada com hidróxido de sódio em temperatura ambiente, e em seguida processada mecanicamente para desfibrar os cavacos de madeira, a polpa produzida apresentava baixa resistência e devia ser misturada a polpa de fibras longas. No processo Kraft a polpa produzida apresentava alta resistência, e adequada para produção de diversos tipos de papéis (DOUGHT, 2000).

Atualmente o processo químico de deslignificação mais utilizado é o Kraft, sendo responsável por mais de 95% de toda a produção mundial de celulose química. Em relação à produção de celulose de eucalipto, ele é o processo quase absoluto (FOELKEL, 2009b).

A polpa de eucalipto possui excelente qualidade para fabricação de vários tipos de papéis, mas em comparação com a polpa de coníferas é menos resistente. Os

papéis produzidos com a polpa de eucaliptos apresentam características desejáveis como facilidade para secar, boa resistência, alto volume específico aparente e alta opacidade, por isso, é uma fonte bastante utilizada pelas fábricas de papéis (DOUGHT, 2000; FOELKEL, 2009c).

Montebello (2006) estudou a evolução da indústria brasileira de celulose entre o período de 1980 e 2005, ela constatou que o aumento no número de compradores da celulose brasileira foi decorrência da maior competitividade, devido ao pequeno tempo de crescimento das árvores, clima favorável, baixo custo de produção e inovações tecnológicas.

A produção de celulose brasileira é sustentada pela madeira colhida nas florestas plantadas de *Eucalyptus sp.* A produtividade média das florestas saltou de 24 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> em 1980 para 44 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> em 2011, esse aumento da produtividade ocorreu graças aos importantes avanços proporcionado pelo melhoramento genético, e as ótimas condições edafo-climáticas para o cultivo do eucalipto (BRACELPA, 2012).

Gomes (2011) estudou o segmento brasileiro da polpa de celulose no período de 2000 e 2009 e concluiu que o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de polpa proveniente de madeira, e o segundo país mais competitivo ficando atrás apenas do Chile.

No Brasil várias espécies de eucaliptos se destacam como fonte de matéria prima para a produção de celulose, dentre elas: *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus camaldulensis*, entre outras, e também híbridos interespecíficos como, por exemplo, o híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (FOELKEL, 2009d).

Segundo dados da BRACELPA (2010) o país produziu aproximadamente 14,1 milhões de toneladas de celulose é o 4º maior produtor de celulose do mundo, e é o líder mundial na produção de celulose de fibra curta branqueada de eucalipto.

### 2.3 Anatomia da madeira

A madeira é formada pelo agrupamento de células com formas e funções diferentes. As células são alongadas e orientadas na direção longitudinal do tronco,

mas também ocorrem posicionadas transversalmente e com formas diferentes, essas variações ocorrem devido à função desempenhada pela célula (SJOSTROM, 1993).

As células se formam através da divisão que ocorrem nos tecidos meristemáticos. O meristema apical é responsável pelo crescimento em altura, e localiza-se no ápice do tronco, ramos e raízes. O meristema cambial é constituído de uma camada de células microscópicas situada entre o xilema e o floema, o qual permanece ativo durante toda a vida do vegetal, e é responsável pela formação dos tecidos que constituem o xilema e a casca (BURGUER et al., 1991).

As células recém-formadas pelo cambio apresentam uma parede primária fina e elástica composta de celulose, hemiceluloses, pectina e proteína. Elas inicialmente crescem até atingirem o tamanho normal e depois inicia a formação da parede secundária com a deposição de celulose, hemiceluloses e lignina (SJOSTROM, 1993).

A parede celular forma-se externamente à membrana plasmática. As primeiras camadas formadas constituem a parede primária, onde a deposição das microfibrilas ocorre em um arranjo entrelaçado. Em seguida ocorre à formação da parede secundária, nela as microfibrilas são depositadas em um arranjo ordenado e formam três camadas designadas S1, S2 e S3, as quais são delimitadas pela mudança na orientação da deposição (KRAUS et al., 2006).

Com o crescimento da árvore em diâmetro as células localizadas próximas ao centro do caule perdem a função fisiológica, tornam-se mais escuras por conta da deposição de substâncias, e a madeira passa a ser denominada de cerne. As células localizadas na região mais externa do caule, são fisiologicamente ativas, apresentam coloração mais clara e são chamadas de alburno (BUTTERFIELD, 2006).

As células da madeira também sofrem variações morfológicas influenciadas pelas condições ambientais. Durante um ciclo de crescimento de aproximadamente um ano a árvore forma uma nova camada de células chamada de anel de crescimento. As células do anel podem ser divididas em duas partes, lenho inicial e lenho tardio. O lenho inicial corresponde ao crescimento da árvore no início do período vegetativo, e o lenho tardio normalmente é formado no final do período vegetativo. As células do lenho inicial possuem paredes celulares finas e lumes grandes, e o lenho tardio possui células com paredes mais espessas e lumes menores (BURGUER et al., 1991).

A madeira de folhosas apresenta diferentes tipos de células e podem ser divididas em três diferentes grupos: condutoras, sustentação e armazenamento. As células jovens armazenam nutrientes, os vasos são células especializadas no transporte de água, e as fibras exercem função sustentação do vegetal. As células quando perdem as funções fisiológicas passam a ter suas cavidades preenchidas com ar e ou água (SJOSTROM, 1993).

A madeira de eucalipto apresenta na sua constituição anatômica entre 65 a 75% do volume de fibras, sendo o restante complementado pelos elementos de vaso e pelas células do parênquima axial e radial. Os eucaliptos possuem cerca de 3 a 25 vasos ou poros por  $\text{mm}^2$  da seção transversal, e variações no diâmetro entre 60 a 250 micrometros e no comprimento de 200 a 600 micrometros. (FOELKEL, 2009a).

A área dos vasos também varia com o desenvolvimento da árvore, na região próxima da medula é de 5 a 8  $\mu\text{m}^2/\text{mm}^2$ , e aumenta com o afastamento da medula em direção a casca para 15 a 20  $\mu\text{m}^2/\text{mm}^2$ . No entanto, ocorre a diminuição na frequência dos vasos, portanto o volume de madeira ocupada por vasos permanece semelhante ao longo do xilema. A maioria das espécies de eucalipto apresenta entre 10 a 20% do seu volume ocupado pelos vasos, mas as espécies com menor densidade básica e crescimento mais rápido possuem maior quantidade e maior diâmetros dos vasos (FOELKEL, 2009e).

Brisola et al. (2011) estudaram ramos vegetativos e a madeira das espécies de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* e do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com cerca de seis anos de idade. A amostragem foi realizada na altura do DAP, e lâminas para observação foram montadas com madeira do alburno. As duas espécies e o híbrido apresentaram estrutura anatômica do lenho semelhante, os vasos apresentaram secção circular, solitários e com distribuição difusa, as fibras do híbrido apresentaram fração parede de 61%, contra 51,57% do *E. grandis*.

#### 2.4 Composição química da madeira

A madeira é quimicamente heterogênea e os seus componentes podem ser divididos em dois grupos: componentes estruturais de alto peso molecular como a celulose, hemiceluloses e a lignina, que são os maiores componentes da parede celular; e os

componentes não estruturais de baixo peso molecular como os extrativos e os compostos inorgânicos (BAEZA et al., 2001).

A composição química da madeira de folhosas é composta por 44% de celulose, 28% de hemiceluloses, 24% de lignina e 4% de extrativos (WALKER, 2006). A madeira apresenta composição química elementar semelhante, porém, os componentes estruturais não estão distribuídos uniformemente nas paredes das células, e a sua concentração pode mudar (FOELKEL, 2009a).

A lamela média é composta por aproximadamente 70% de lignina, a lamela média mais a parede primária possuem mais de 50% de lignina e a camada S2 apresenta 20% da lignina da célula. No entanto, por conta da parede secundária ser mais espessa, 75% de toda a lignina da célula encontra-se na parede secundária (WALKER, 2006).

#### 2.4.1 Celulose

As plantas transformam o dióxido de carbono e a água inicialmente em moléculas de glicose, as quais se combinam e formam moléculas muito maiores chamadas de celulose (MARRISON et al., 1996).

A formação da molécula de celulose  $(C_6H_{10}O_5)_n$  ocorre devido as ligações sucessivas entre hidroxilas do carbono 1 de  $\beta$ -D-glucoses, com hidroxilas do carbono 4 de outras  $\beta$ -D-glucoses, dando origem a um polímero linear formado exclusivamente por unidades de  $\beta$ -D-glucose. O número de unidades de  $\beta$ -D-glucoses ligadas é chamado grau de polimerização, e são encontrados valores médios na faixa de 1000 a 15000 (D`ALMEIDA, 1988; MARRISON et al., 1996).

A estrutura fundamental da parede celular é formada por microfibrilas de celulose. Ela é uma estrutura filamentosa que tem cerca de 10 a 25 nanômetros de diâmetro e composta de 30 a 100 moléculas de celulose que se unem paralelamente por meio de ligações de hidrogênio (KRAUS et al., 2006).

A celulose é o principal constituinte da madeira, representa entre 40 – 45% da substância madeira seca na maioria das espécies, e está localizada predominantemente na parede secundária das células (SJOSTROM, 1993).

### 2.4.2 Hemiceluloses

As hemiceluloses são polissacarídeos formados em rotas biossintéticas diferentes da celulose. O termo hemiceluloses refere-se a uma mistura de polímeros polissacarídeos de baixa massa molecular, os quais estão intimamente ligados com a celulose nos tecidos das plantas. Na composição podem aparecer condensados em proporções variadas, as seguintes unidades de açúcar:  $\beta$ -D-glucoses,  $\beta$ -D-xilose,  $\beta$ -D-manose,  $\alpha$ -D-galactose, ácido  $\beta$ -D-glucourônico, ácido  $\beta$ -D-galactourônico, e ácido  $\alpha$ -D-4-O-metilglucourônico (D'ALMEIDA, 1988; SJOSTROM, 1993).

As principais características estruturais das hemiceluloses são: apresenta baixo peso molecular, cadeias mais curtas que as de celulose com grau de polimerização variando de 80 a 200, grande acessibilidade e suscetibilidade a hidrólise devido ao baixo peso molecular e ausência de estruturas cristalinas (WALKER, 2006).

### 2.4.3 Lignina

A lignina está entre os biopolímeros mais complexos, a elucidação da sua estrutura química foi uma formidável tarefa, requerendo quase 140 anos de esforços de alguns dos melhores químicos de produtos naturais do mundo, ainda há muitos detalhes da lignina para serem descobertos, no entanto muitas características estruturais já são conhecidas (CRAWFORD, 1981).

Higuchi et al. (1977) apud Crawford (1981) definiram três grandes grupos de lignina:

- Lignina guaiacila: encontrada em muitas coníferas, licopódios, samambaias e cavalinhas;
- Lignina guaiacila-siringila: encontrada principalmente nas angiospermas dicotiledôneas e em poucas gimnospermas;
- Lignina hidroxifenil guaiacila-siringila: encontradas em gramíneas e em madeira de compressão nas coníferas.

A lignina é uma substância aromática quase totalmente insolúvel em muitos solventes, ela não pode ser quebrada em unidades por que quando sofre hidrólise, oxida e sofre reações de condensação rapidamente. A lignina das folhosas contém a relação

das unidades das ligninas guaiacila e siringila de 4:1 a 1:2, e pequenas quantidades da lignina hidroxifenil (WALKER, 2006).

Segundo Foelkel (2009b) as espécies ou clones com alta relação siringila/guaiacila e baixo teor de lignina total, como por exemplo, o *Eucalyptus globulus*, possuem os melhores rendimentos de celulose.

#### 2.4.4 Extrativos

O termo “extrativo” é usado para descrever um grande número de componentes químicos presentes na madeira. A quantidade desses componentes pode variar de 1 a 20%, dependendo da espécie e do tecido da árvore. Os extrativos aumentam a massa da madeira, mas não contribuem com a resistência física e com o rendimento da produção de polpa de celulose (WALKER, 2006).

A maior quantidade dos extrativos da madeira tanto nas coníferas como nas folhosas estão localizados no cerne, e alguns são responsáveis pela coloração mais escura e pelo aumento da durabilidade da madeira. Os extrativos podem ser extraídos usando solventes, em muitos casos são classificados conforme o solvente usado para extraí-los. Eles são constituídos de principalmente de ácidos graxos, alcoóis, terpenos, fenóis, ácidos resinosos (ROWELL et al., 2005).

Os extrativos são depositados nos lumes das células durante a cernificação, os cavacos produzidos de madeiras mais velhas ou das partes mais internas da árvore podem ter maiores teores de extrativos, e conseqüentemente maior dificuldade para impregnação da madeira, menor rendimento da polpa, e maior teor de rejeitos (FOELKEL, 2009e).

#### 2.5 Teor de umidade da madeira

A madeira de árvores recém-abatidas apresenta altos teores de umidade, que tendem a reduzir espontaneamente e lentamente à medida que as toras aguardam o processamento. A perda de água reduz o peso da madeira diminuindo o custo com transporte, e aumenta a resistência da madeira (GALVÃO et al., 1985).

O teor de água influencia na picagem da madeira porque as propriedades da madeira variam com a umidade. Quando o teor de umidade está abaixo do ponto de saturação das fibras, a demanda por energia cresce, o cavaco será mais fino e a quantidade de finos aumenta (GULLICHSEN et al., 2000).

A umidade constante da madeira facilita as operações no processo de polpação e permite produzir uma polpa mais uniforme. No entanto, muitas indústrias de celulose têm variações na umidade da madeira, e muitas delas produzem celulose com a umidade da madeira variando entre 25 a 65% (INGRUBER et al., 1985).

Os cavacos mais úmidos produzidos de árvores com menor tempo pós-colheita possuem maior facilidade de serem impregnados. O maior teor de umidade também favorece a difusão dos íons do licor de cozimento e diminui a presença de ar no interior dos cavacos (FOELKEL, 2009b).

A variação do teor de umidade da madeira também afeta a acomodação dos cavacos no digestor, os cavacos úmidos acomodam mais densamente. A ocorrência de grandes variações de umidade pode favorecer o supercozimento ou subcozimento, e assim produzir polpas desuniformes em relação ao teor de rejeitos e branqueamento (INGRUBER et al., 1985).

O teor de umidade da madeira é mensurado pela relação entre o peso da água de um dado pedaço de madeira pelo seu peso completamente seco. O peso seco da madeira é frequentemente referido como peso seco em estufa porque a secagem em estufa é o método mais comum. Essa razão é tradicionalmente expressa em percentagem do teor de umidade (HOADLLEY, 2000).

A madeira seca inibe acomodação dos cavacos consideravelmente e pode causar uma redução da produção pela redução da produtividade individual do digestor. A umidade ideal é estimada em aproximadamente em 45% tanto para satisfazer a penetração bem como a produção. O problema da variação da umidade é bastante atenuado pela pré-vaporização dos cavacos antes do cozimento que tende a ajustar a umidade para o nível de 50% (INGRUBER et al., 1985).

Oliveira et al. (2005) estudaram a variação da umidade da madeira fresca de sete espécies de *Eucalyptus* com 16 anos. Os autores observaram uma variação na

média da umidade entre as espécies, sendo que o *E. citriodora* apresentou o menor teor de umidade (62%) e o *E. grandis* o maior teor de umidade (102%).

A variação do teor de umidade da madeira nas direções radial e longitudinal no tronco das árvores é negativamente correlacionada com a sua densidade. As madeiras com maior densidade possuem menores volumes ou vazios internos e, portanto, menor espaço para preenchimento com água livre ou de capilaridade (OLIVEIRA et al., 2005).

## 2.6 Densidade básica da madeira

A densidade é a relação entre a massa e o volume, podendo ser expressa como densidade real ou aparente. Na densidade real considera-se apenas os elementos anatômicos da parede celular, ela varia de 1,53 a 1,55 g.cm<sup>-3</sup> para todas as madeiras. Com relação à densidade aparente, além da parede celular também são considerados os espaços ocupados pelos lúmens, elementos celulares, pontuações, perfurações, etc. (VITAL, 1984).

A densidade da madeira é um fator importante para a indústria de celulose e papel, devido a sua relação com o processamento industrial e com a qualidade dos produtos finais. Ela possui diferenças entre as espécies de madeiras, diferentes árvores de uma mesma espécie e diferentes posições de uma mesma árvore. A densidade é uma das variáveis da madeira com maior correlação com a quantidade de celulose produzida no processamento industrial (SOUZA et al., 2002).

A densidade básica e o rendimento da polpa determinam a massa de polpa produzida com dado volume de madeira. A variação da densidade básica é decorrente das alterações físicas e químicas que ocorrem na madeira, em função da taxa de crescimento, clima, genética e manejo silvicultural. A densidade geralmente aumenta do centro para a casca e da base para o topo do caule (DOWNES et al., 1997).

A madeira mais densa apresenta maior quantidade de substância sólida em um mesmo volume, portanto a porosidade e a capilaridade para entrada de líquidos também serão menores, além disso, as madeiras mais densas geralmente produzem cavacos mais espessos (FOELKEL, 2009b).

A madeira de densidade alta é mais dura e mais difícil para picar, portanto necessitam de ajustes da operação, mais manutenção do picador e aumento no consumo de energia, e produz cavacos com dimensões mais variadas (PARHAM, 1983).

A densidade da madeira é um importante fator econômico da polpação, por que madeira mais densa condiciona mais peso dentro de um dado volume do digestor e assim pode aumentar a produção de polpa, seja em cozimento por batelada ou por unidade de tempo ou em um digestor contínuo (MIMMS et al., 1993).

As variações na densidade da madeira são decorrentes das variações nos componentes estruturais da madeira, portanto, a densidade pode variar devido ao tamanho e frequência dos vasos, dimensões das fibras (espessura e diâmetro da parede), percentagem de parênquima, e composição química (DOWNES et al., 1997).

Carpim et al. (1985) estudaram a densidade e o comprimento das fibras da madeira de discos retirados no DAP de árvores de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* de diferentes procedências e com 7 anos de idade. Em cada disco foi retirado uma cunha e seccionada em cinco partes: medula, 25, 50, 75 e 100% de distancia da medula. Os autores observaram que a densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* aumentou no sentido medula casca em todas as procedências e o comprimento das fibras também apresentou tendência de aumento.

Santana et al. (2012) estudaram o efeito da idade e do diâmetro das toras na densidade básica da madeira. No trabalho utilizou-se madeira de *Eucalyptus grandis* com 34, 48, 61, 74 e 86 meses de idade. A densidade básica apresentou diferença altamente significativa entre os tratamentos, variando de 364,8 Kg/m<sup>3</sup> na madeira com 34 meses a 452,3 Kg/m<sup>3</sup> na madeira com 86 meses. O diâmetro das toras também influenciou significativamente na densidade básica, com tendência de aumento da densidade com o aumento da classe diamétrica das toras.

A indústria de celulose seleciona madeira de *Eucalyptus spp* com densidade básica de 450 kg.m<sup>-3</sup>, com limites entre 400 e 550 kg.m<sup>-3</sup>. A madeira com alta densidade básica aumenta o consumo de álcali e o teor de rejeitos do cozimento, e madeira com baixa densidade diminui o rendimento de polpa base volume de digestor, podendo até mesmo resultar em perda de produtividade industrial (SOUZA et al., 2002).

Dias et al. (1985) concluíram após realização de um experimento com 25 árvores de um híbrido natural de *Eucalyptus grandis*, com 7 (sete) anos de idade e densidades básicas variando de 418 a 666 kg.m<sup>-3</sup> que, o rendimento de polpação atingiu o máximo com densidades em torno de 470 kg.m<sup>-3</sup>, tornando a decrescer com o aumento da densidade básica, acompanhado de um constante incremento nos rejeitos.

Andrade (1987) observou em cavacos retirados da madeira de *Eucalyptus grandis* com 7 anos de idade, amostrados em duas regiões do DAP no sentido medula-casca, valores de densidade bastante variáveis. Para a região B; intermediária entre medula e casca, o valor médio da densidade básica foi de 0,416 g.cm<sup>-3</sup>, com variações de 0,316 g.cm<sup>-3</sup> a 0,586 g.cm<sup>-3</sup>. Na região A, próxima a casca ou periférica, a variação da densidade foi de 0,331 g.cm<sup>-3</sup> a 0,598 g.cm<sup>-3</sup>, com uma média geral de 0,486 g.cm<sup>-3</sup>.

Santos et al. (2008) estudaram o efeito da densidade básica sobre o potencial de produção de papel. No experimento foram utilizadas três amostras de cavacos com densidades diferentes, duas delas provenientes da madeira de dois clones e a terceira coletada em uma indústria de celulose, todas da espécie *Eucalyptus globulus* com densidades de 0,467, 0,537 e 0,600 g.cm<sup>-3</sup>. Os autores concluíram que as amostras com densidade mais alta possuíam maior rendimento da polpa.

## 2.7 Picagem da madeira

No início da década de 1960 vários projetos de novos picadores foram introduzidos industrialmente com o objetivo de minimizar a danificação da madeira e produzir cavacos finos com espessura uniforme (INGRUBER et al., 1985).

Nos dias de hoje a qualidade dos cavacos tornou-se um conceito muito importante na fabricação de celulose, devido ao aumento da concorrência entre os produtores de polpa e o aumento dos custos da matéria prima. A qualidade dos cavacos produzidos pelos picadores é de crucial importância para a sequência do processo de produção de celulose (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL, 1999).

Existem diferentes tipos de picadores de madeira, mas o mais comum é o picador de disco, este equipamento varia em tamanho e conseqüentemente no número de facas (ASSUMPCÃO, 1988; BENEFIEL, 2006). Esse equipamento usa como mecanismo um

disco picador giratório com diâmetro que varia de 1,20 a 3,0 metros, sobre ele podem ser montadas de 4 a 20 facas radialmente com diferentes configurações (FULLER, 1983).

O picador deve ser rápido e econômico devido às grandes quantidades de madeira picadas, ele ainda deve produzir pouco resíduo e cavacos com tamanho relativamente uniforme e pouco danificado (FULLER, 1983).

As facas do picador industrial cortam fatias da tora, as quais são fracionadas em cavacos pelo impacto com o equipamento. A ação mecânica da picagem é bastante impactante e podem causar microfissuras e microfraturas nas paredes e entre as células da madeira (FOELKEL, 2009b).

Os cavacos são formados pelo corte perpendicular a direção da grã da madeira pelas facas do picador. As regulagens do equipamento podem modificar o comprimento e a espessura média dos cavacos (GULLICHSEN et al., 2000).

O comprimento dos cavacos é delimitado pelo corte das lâminas dos picadores, existe diferença entre os dois lados cortados dos cavacos, por conta do esmagamento causado em um dos lados pelo ângulo da faca de corte, o lado mais danificado apresentará maior capilaridade e conseqüentemente maior penetração de líquido (FOELKEL, 2009b).

Os cavacos picados com comprimento menor terão maior número de fibras cortadas, portanto mais fibras menores por unidade de volume de madeira e poderá causar redução da resistência da polpa (FULLER, 1983).

Os danos às fibras da madeira de coníferas são consideráveis se os cavacos forem picados com comprimento abaixo de 20 milímetros. Os cavacos de folhosas podem ser cortados com comprimento de 10 milímetros e apresentarem poucas fibras com danos no comprimento (GULLICHSEN et al., 2000).

A alteração no ângulo de corte tem uma pronunciada influência sobre a qualidade dos cavacos. Com o aumento desse ângulo crescerá a quantidade de cavacos pequenos, a espessura e a densidade a granel. A redução deste ângulo resultará no aumento na área da superfície de corte, o que reduz o diâmetro máximo das toras que poderão ser picadas. Apesar dos efeitos negativos a tendência é a redução do ângulo de corte dos picadores (HARTLER, 1996).

O aumento da velocidade de picagem eleva a relação de cavacos finos, por outro lado, a redução da velocidade eleva a relação de cavacos mais grossos. A velocidade ótima determinada no picador de teste foi de aproximadamente 20 m/s. Contudo, testes em outro modelo de picador mostraram que uma redução na velocidade de corte juntamente com a diminuição do comprimento dos cavacos, proporcionou a redução de finos sem aumentar os cavacos sobre-espessos (ABTCP, 1999).

## 2.8 Dimensões dos cavacos

No processo de transformação da madeira em fibras, a qualidade e a uniformidade dos cavacos que entram no processo é importante para a eficiência do cozimento, branqueamento ou refinamento mecânico, porque quanto maior a variação das dimensões dos cavacos, maior será a responsabilidade da eficácia do tratamento químico (INGRUBER et al., 1985).

Um cavaco típico de madeira deve medir de 15-20 milímetros de comprimento na direção de grã, 12-25 milímetros de largura, e apenas 3-6 milímetros na secção mais curta, transversal a grã da madeira, assim a razão comprimento/espessura é de aproximadamente 4 para 1 (GRACE et al., 1989a).

Para Smook (2002) a qualidade dos cavacos é medida pela uniformidade das dimensões (comprimento e espessura dos cavacos) e pela ausência de “contaminantes”. Todos os cavacos com 10 a 30 mm de comprimento e de 3 a 6 mm de espessura são normalmente considerados de boa qualidade. Segundo o mesmo autor são considerados contaminantes:

- Cavacos acima do tamanho no comprimento ou na espessura (“oversizes chips”);
- Cavacos com comprimento normal, mas espessura e largura menores que 3 milímetros, palitos (“pin chips”);
- Cavacos muito curtos ou fragmentados, normalmente passam por peneiras com orifícios circulares de 3 milímetros, finos (“fines”);
- Cascas e madeira podre;
- Areia e outros materiais.

Os cavacos preferidos são aqueles que possuem entre 15 a 25 mm de comprimento e espessura de 2 a 8 mm. Os cavacos muito espessos terão dificuldades de impregnação, consumirão mais álcali, produzirão polpa com alto teor de rejeitos, e conseqüentemente o rendimento da conversão da madeira em celulose diminuirá. Os cavacos muito pequenos também são indesejáveis, pois apresentam mais danos mecânicos e consomem mais reagentes durante a polpação (FOELKEL, 2009b).

Para a indústria de celulose a presença de nós é sempre considerada indesejável, porque eles contribuem para perdas de rendimento na depuração da polpa. Os nós são extremamente duros e densos, contem alta proporção de madeira de reação e são muito difíceis de picar. Na polpação química a madeira dos nós é subcozida e a maior parte termina como rejeitos (PARHAM, 1983).

Os cavacos acima do tamanho são problemáticos, e a principal causa dos rejeitos na polpação química. Os palitos, finos e a madeira podre causam a redução do rendimento e na resistência da polpa e contribuem para os problemas de circulação do sistema de polpação (SMOOK, 2002).

Os cavacos muito compridos podem causar bloqueios nos sistemas de transporte, no manuseio e aumentar consideravelmente o teor de rejeitos, enquanto que os cavacos finos são considerados como matéria prima perdida, pois não poderão ser recuperados através da repicagem (ABTCP, 1999).

Na polpação Kraft a espessura é o parâmetro mais importante para determinar a qualidade dos cavacos. Isso porque o licor de cozimento deve ser capaz de penetrar em todas as direções. Portanto, a espessura é a dimensão que determina quando o cavaco será completamente penetrado (MIMMS et al., 1993).

A tentativa de compensar a espessura do cavaco com o aumento do tempo de cozimento, ou da concentração do licor pode resultar em melhor cozimento interno, mas as partes externas serão muito cozidas, reduzindo o rendimento e resistência da polpa (MIMMS et al., 1993).

Twaddle (1997) estudou a influência do comprimento dos cavacos sobre a espessura em diferentes espécies. Os cavacos foram produzidos pela picagem das pranchas de madeira em equipamento hidráulico de laboratório, as pranchas foram serradas com três diferentes ângulos de orientação dos anéis de crescimento. As médias da espessura

dos cavacos, independentemente da orientação dos anéis, aumentaram nas quatro espécies estudadas com o aumento do comprimento dos cavacos.

Tessier et al. (2000) estudaram estatisticamente dados coletados em 16 meses por uma indústria de celulose e construíram um modelo empírico ligado a distribuição do tamanho das frações e qualidade do papel. Eles concluíram que 40% da variabilidade na qualidade da polpa podem estar associadas às mudanças das características dos cavacos.

Broderick et al. (1998) estudaram o efeito das dimensões dos cavacos da madeira na qualidade da polpa. Cavacos de madeira foram classificados por tamanho, e as frações foram medidas manualmente para determinar a distribuição do comprimento, largura e espessura. As frações de cavacos foram deslignificadas pelo processo bissulfito de magnésio de baixo rendimento, e as folhas da polpa foram testadas. A qualidade da polpa para cavacos pequenos (fração ¼”) foi correspondente ou superior a dos cavacos mais longos (fração ¾”).

## 2.9 Polpação Kraft

O alemão Carl F. Dahl é o inventor da técnica de polpação Kraft, o processo foi desenvolvido em 1879 e patenteado apenas em 1884, o primeiro cozimento foi realizado utilizando madeira de coníferas em 1885 em uma fábrica Sueca (DAHL, 1989).

O processo de polpação química funciona com alta temperatura (140 - 180°C) e pressão (0,6 - 1,0 MPa), e necessita de um bom sistema de recuperação dos reagentes químicos. A polpação Kraft possui algumas vantagens importantes, como: recupera grande parte dos reagentes químicos, cozinha a madeira de várias espécies, tempo menor de cozimento, polpa com excelente resistência, e permite que a indústria seja autossuficiente em energia (WALKER, 2006).

Os reagentes químicos utilizados na polpação são o hidróxido de sódio (NaOH) e o sulfeto de sódio (Na<sub>2</sub>S) e outros sais inativos como o carbonato de sódio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Os componentes ativos no licor de cozimento são os íons hidroxila (OH<sup>-</sup>) e os íons hidrosulfetos (SH<sup>-</sup>). A concentração e a carga total dos íons SH<sup>-</sup> e OH<sup>-</sup> são os elementos chaves de todas as reações que acontecerem durante a polpação. A solução aquosa desses reagentes passa a ser chamada de licor de cozimento (MIMMS et al., 1993).

Foelkel (2009b, p. 16) descreve: “O rendimento do processo de polpação Kraft com madeira de Eucalipto varia entre 49 a 57%, dependendo principalmente da espécie e idade da árvore e da tecnologia empregada”.

Na polpação Kraft o ideal seria dissolver somente a lignina, mas os íons hidroxila também reagem com a celulose e hemiceluloses, e aproximadamente 20% da madeira original é perdida em razão da perda dos polissacarídeos, principalmente as hemiceluloses. As hemiceluloses são degradadas mais rapidamente e em maior quantidade, porque as suas moléculas são menores e ramificadas, e também estão mais expostas na estrutura da madeira (MIMMS et al., 1993).

A celulose é mais resistente ao ataque do licor de cozimento que os outros componentes, no entanto o grau de polimerização da cadeia de celulose também é reduzido, e aproximadamente 5% do peso da madeira é perdido (GRACE et al., 1989b).

A hidrólise é uma reação que se torna importante quando o cozimento atinge temperaturas próximas dos 170° C. Essa reação quebra a cadeia de celulose em duas partes, criando um novo grupo final que pode sofrer novamente essa divisão, quanto mais reações ocorrer, mais celulose será dissolvida e menor o rendimento da polpa (MIMMS et al., 1993).

A dificuldade de remover toda a lignina em cozimentos alcalinos foi observada por pesquisadores já no ano de 1936. Em cozimento alcalino com zero de sulfidez, a temperaturas 100 a 180° C, foi necessário dissolver quase toda a madeira de Spruce para que toda a lignina fosse removida. Na prática as indústrias de celulose que utilizam madeira de fibra longa interrompem o cozimento quando o teor de lignina residual está entre 4% a 5% o que corresponde ao número Kappa entre 26 a 33. Nas indústrias que processam madeira fibra curta a deslignificação é mais rápida, e o teor residual de lignina mais baixo ao redor de 2% (GRACE et al., 1989b).

## 2.10 Impregnação dos cavacos

A impregnação dos cavacos inicia quando o licor de cozimento é adicionado junto aos cavacos. O objetivo da impregnação é distribuir o licor de cozimento uniformemente dentro dos cavacos. A impregnação consiste de dois diferentes processos:

penetração pelos poros da madeira e difusão. A difusão significa que os íons e as moléculas se movem de uma área com alta concentração para outra de menor concentração, a difusão dos reagentes químicos ocorre somente se os poros da madeira já estiverem preenchidos pelo licor (MIMMS et al., 1993).

A impregnação ocorre em meio bem alcalino (pH = 12,5 a 14,0) com velocidade de penetração do licor de 5 a 15 vezes mais rápida do que a difusão, porém quando o cavaco está saturado a velocidade da difusão aumenta bastante. Assim, torna-se mais rápido para os íons atingirem o centro do cavaco pela espessura em comparação com as demais dimensões do cavaco (FOELKEL, 2009b).

A penetração do licor é um fenômeno físico da entrada do licor através da porosidade e capilaridade, ela é mais rápida em cavacos secos, entretanto, quanto mais seco maior a quantidade de ar contida dentro do cavaco. O ar aprisionado dentro do cavaco dificultará a impregnação, devido à resistência oferecida ao licor (FOELKEL, 2009b).

No sentido das fibras está a máxima capilaridade possível da madeira para penetração. Nessa seção, temos entre 40 a 45% de porosidade ou poros livres, muito maiores que nas outras seções (tangencial e radial). É por isso que a penetração é tão rápida pelo topo e pela base dos cavacos (FOELKEL, 2009b).

As madeiras com baixa densidade básica são ricas em vasos e podem ser mais facilmente impregnadas e deslignificadas, e produzir polpas com maiores rendimentos e menores teores de rejeitos (FOELKEL, 2009e).

Nos licores de cozimento com pH acima de 13,0 a difusão dos íons hidroxilas ocorrerá nas três direções do cavaco praticamente simultaneamente. Entretanto em licores com pH abaixo de 13, a difusão na direção longitudinal é de aproximadamente cinco vezes mais rápida que na direção transversal, portanto os íons alcançarão o centro do cavaco principalmente pela difusão no sentido da grã. (GRACE et al., 1989a).

A madeira absorve aproximadamente 5% de seu peso em NaOH durante a polpação. Com a penetração do licor a concentração de álcali diminui, e se forma gradiente entre o lado de fora e o centro do cavaco, que deve permanecer suficiente para o cozimento realizar-se completamente. Esse afeito da absorção é a maior razão para utilizar cavacos finos na polpação alcalina. Em cozimentos com licor alcalino a penetração apresenta

uma velocidade quase igual nas três dimensões do cavaco, mas o gradiente da concentração química aumenta com a espessura do cavaco (INGRUBER et al., 1985).

Existe abundante evidencia prática qualitativa de que cavacos tratados com álcali apresentam uma frente de impregnação que avança para o interior da madeira. O álcali presente no líquido que enche os vasos e os lumes dos traqueídeos no início da impregnação não alcança a parte interior dos cavacos, pois é consumido por neutralização ou desacetilação logo após a penetração dos cavacos (INALBON et al., 2005).

Os íons hidroxilas do licor de cozimento são neutralizados quando entram nos cavacos e reagem com a madeira, reduzindo a concentração desses íons. Nos cavacos muito espessos se o pH no centro do cavaco cair muito, abaixo do pH 12,5, reduzirá a taxa de difusão na sentido da espessura do cavaco, conseqüentemente a deslignificação ocorrerá lentamente. Se ao final do cozimento a deslignificação do centro do cavaco não ocorreu tanto quanto necessário para a liberação das fibras, essa parte do cavaco ficará subcozida e será removida da polpa durante a depuração como rejeito (GRACE et al., 1989a).

A pré-vaporização dos cavacos é normalmente realizada durante o enchimento do digestor. Nos digestores contínuos existe um vaso especial por onde os cavacos passam antes de entrarem no digestor, com objetivo de elevar a umidade e retirar o ar. O ar aprisionado dentro dos cavacos dificulta a penetração do licor de cozimento e poderá resultar em um cozimento irregular (MIMMS et al., 1993).

A presença de água no interior da madeira atua como uma barreira para a penetração, mas recebe facilmente os íons ativos por difusão. A impregnação se completará quando todas as camadas e paredes estiverem molhadas pelo licor de cozimento e o fluxo iônico causado pela difusão se equilibrar, ou seja, quando as concentrações de íons ativos estiverem iguais tanto no licor de dentro quanto fora dos cavacos. (FOELKEL, 2009b).

A impregnação eficiente dos cavacos favorece a redução do teor de rejeitos, do número kappa e do consumo de álcali efetivo, nessa fase ocorre uma perda da madeira na ordem de 5 a 10% podendo ser ainda maior quando ocorre em temperaturas muito altas (FOELKEL, 2009b).

### 2.11 Qualidade das fibras

Vários tipos de matérias primas podem ser utilizadas para produzir papel, mas as fibras de madeira são as mais usadas. As fibras de madeira são divididas em dois grupos, o primeiro composto pelas fibras longas, normalmente produzidas com madeira de coníferas, e o segundo grupo das fibras curtas provenientes de madeira de folhosas (DOWNES et al., 1997).

As fibras da polpa de coníferas são mais longas que as fibras da polpa de eucalipto, por isso o papel produzido com a polpa de coníferas são mais resistentes que os produzidos com polpa de eucalipto. Entretanto, a polpa de eucalipto também produz papéis relativamente fortes, densos e com facilidade para secar (FOELKEL, 2009d).

A qualidade da celulose e do papel é influenciada pelas características das fibras, como o comprimento, diâmetro e espessura da parede das fibras. A densidade da madeira correlaciona-se intimamente com a qualidade das fibras, madeira mais densa possuem fibras relativamente mais espessas e mais resistentes, enquanto que as fibras de madeira menos densas colapsam mais facilmente (DOWNES et al., 1997).

Em trabalho usando madeira de dois clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* ambos com 6 anos de idade, e com densidade de 450 kg/m<sup>3</sup> e 550 Kg/m<sup>3</sup>, a autora concluiu que a espessura da parede e o diâmetro do lume das fibras influenciaram a densidade básica da madeira, mas a largura e o comprimento das fibras não tiveram efeito sobre a densidade. O clone com maior densidade também apresentou menor área da madeira com espaços vazios por conta da maior frequência de vasos com menor diâmetro (QUEIROZ, 2002).

Rocha et al. (2004) estudaram a variação dos elementos anatômicos no sentido axial e radial na madeira de *Eucalyptus grandis* com sete anos de idade e de três classes sociológicas diferentes (dominante, dominada e intermediária). Os autores concluíram que as árvores dominantes apresentaram fibras 13,9% mais longas, parede 16,5% mais espessas e vasos 31,6% mais largos que as árvores dominadas. Na avaliação axial os maiores valores das dimensões das fibras foram observados entre 0 e 25% da altura comercial, e os vasos mais longos foram encontrados a 75% da altura comercial. Na direção radial o

comprimento das fibras, diâmetro tangencial, lume e parede apresentaram tendência de aumento.

O refino é um tratamento mecânico aplicado na celulose com determinada consistência, utilizando equipamentos mecânicos com alto consumo de energia. O refino modifica as características estruturais das fibras e é importante para a qualidade final do papel produzido (BUSNARDO, 1990).

As fibras submetidas ao processo de refino são esmagadas, desfibriladas e cortadas, essas modificações efetuadas dentro de limites proporcionam aumento na área de contato entre as fibras, e conseqüentemente aumenta a resistência da celulose (MILANEZ et al., 1982).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Departamento de Recursos Naturais – Ciências Florestais da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” em Botucatu - SP, nos laboratórios de química da madeira e celulose e papel.

#### 3.1 Material

Os cavacos utilizados no trabalho foram coletados na empresa Lwarcel Celulose e Papel, localizada no município de Lençóis Paulista - SP. A amostra com aproximadamente 48 quilos foi coletada após o processo de classificação dos cavacos, em um dia normal de funcionamento da empresa, sem alteração das regulagens dos equipamentos. A amostra foi acondicionada em sacos plásticos para o transporte até a Universidade, onde coletou três amostras 25 gramas para determinar a umidade e o restante dos cavacos foram colocados para secar ao ar.

Os cavacos foram produzidos a partir da madeira de *Eucalyptus grandis* com sete anos de idade. Os toretes foram picados e classificados nos equipamentos industriais da empresa, os dados técnicos do picador e do classificador estão apresentados nas Tabelas 1 e 2. Os cavacos chegaram ao laboratório com umidade média de 29%, e permaneceram secando por três meses.

Tabela 1 – Dados técnicos do picador de toretes industrial

Quantidade de facas	12 facas
Comprimento das facas	900 mm
Largura	125 mm
Distância da placa a faca	12 mm
Ângulo de corte	32°
Peso de uma faca	9,6kg
Diâmetro de toras processadas	0 a 350 mm
Comprimento nominal do cavaco	20 mm
Rotação do disco de corte	320 rpm
Temperatura de trabalho dos mancais	50 a 65 °C
Potência de acionamento	2x 600 (cv)
Peso sem os motores	2,5 t
Acionamento do freio do picador	Hidráulico
Tempo de frenagem	50 a 60s
Capacidade de produção	160 t/h
Produção média	125 t/h
Saída de cavaco	Inferior por gravidade
Produção para troca de facas	2000st

Tabela 2 – Dados técnicos do classificador industrial

Capacidade Nominal de Produção	400m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
Números de peneiras	3
Inclinação das peneiras	8°
Frequência de Oscilação	200 rpm
Amplitude de Oscilação	80 mm
Diâmetro dos cabos de Sustentação	1" - 25,4 mm
Potência de acionamento	15 cv / 1170 rpm
Peso aproximado do Equipamento	16.000kg
Diâmetro da Malha Superior	45 mm
Diâmetro da Malha Intermediária	25 mm
Diâmetro da Malha Inferior	07 mm

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Classificação da amostra

Inicialmente separou-se 20% da amostra para o tratamento controle. Em seguida, retiraram-se manualmente todos os nós e os cavacos com nós, os quais foram agrupados e formaram a fração dos nós. O restante dos cavacos foi classificado manualmente em seis frações com dimensões mais homogêneas.

O tamanho dos cavacos de cada fração foi definido através da escolha arbitrária de seis cavacos, cada cavaco escolhido tornou-se referência de tamanho para uma fração. Os cavacos de referência serviram como parâmetro para a classificação dos demais cavacos da amostra.

No final da classificação sobram alguns cavacos com dimensões muito diferentes dos cavacos de referência, eles apresentavam comprimento muito grande e a espessura e largura muito pequenas, portanto foram agrupados e formaram mais uma fração denominada de lascas.

A Tabela 3 mostra as dimensões médias dos cavacos dos tratamentos, sendo eles denominados de: fração 1; fração 2; fração 3; fração 4; fração 05; fração 06; fração 07 (nós); fração 08 (lascas); tratamento controle. Entretanto, devido à pequena quantidade de cavacos da fração oito, ela somente teve a massa dos cavacos quantificada. A fração sete também não teve as dimensões mensuradas devido à alta desuniformidade das dimensões e impossibilidade de definir o comprimento, largura e espessura dos cavacos.

Tabela 3 – Dimensões médias dos tratamentos

Tratamentos	Dimensões médias em milímetros		
	Comprimento	Largura	Espessura
Fração 1	37,0	36,6	5,0
Fração 2	29,8	24,8	3,8
Fração 3	26,5	16,9	3,1
Fração 4	24,9	11,7	2,8
Fração 5	22,7	8,3	2,1
Fração 6	18,7	3,9	1,2
Fração 7	NM	NM	NM
Fração 8	NM	NM	NM
Tratamento controle	23,4	9,1	2,1

NM dimensão não mensurada

### 3.2.2 Determinação do teor de umidade dos cavacos

O teor de umidade dos cavacos foi determinado conforme a norma T 258 om-94 (TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY, 1994). O processo iniciou com a coleta de duas amostras com aproximadamente 25 gramas de cavacos de cada tratamento, exceto da fração lascas, devido à pequena quantidade de cavacos

desta fração. As amostras foram colocadas em placas de petri previamente pesadas, pesadas novamente com os cavacos e levadas para estufa onde permaneceram até atingir o peso constante em temperatura de  $103 \pm 2^\circ \text{C}$ . O teor de umidade foi obtido utilizando a Equação 1.

$$U = \frac{P_u - P_s}{P_u} \times 100 \quad (1)$$

Sendo:

U = teor de umidade, %;

$P_u$  = peso úmido dos cavacos, g;

$P_s$  = peso seco dos cavacos, g.

### 3.2.3 Determinação das massas e dimensões dos cavacos

As frações classificadas foram pesadas em balança semi-analítica com precisão de 0,01 g para determinação da massa de cada fração. A pesagem foi feita utilizando um recipiente de 2 litros, onde os cavacos foram colocados para facilitar a pesagem. As frações com volume de cavacos superior a capacidade do recipiente foram fracionadas, e as partes pesadas separadamente. O peso úmido de cada fração foi convertido para peso seco utilizando o teor de umidade de cada tratamento.

A mensuração das dimensões foi efetuada em 300 cavacos de cada fração e integral (controle), exceto nas frações nós e lascas devido à grande desuniformidade e pequena quantidade de cavacos. O conjunto de cavacos de cada fração foi separado pelo método do quarteamento, e as dimensões (comprimento, largura e espessura) mensuradas com um paquímetro. O comprimento dos cavacos foi considerado como a distância compreendida entre os corte das lâminas do picador, a largura a secção transversal ao comprimento e a espessura a distância compreendida entre as duas superfícies da largura. As dimensões dos cavacos estão exemplificadas na Figura 1.

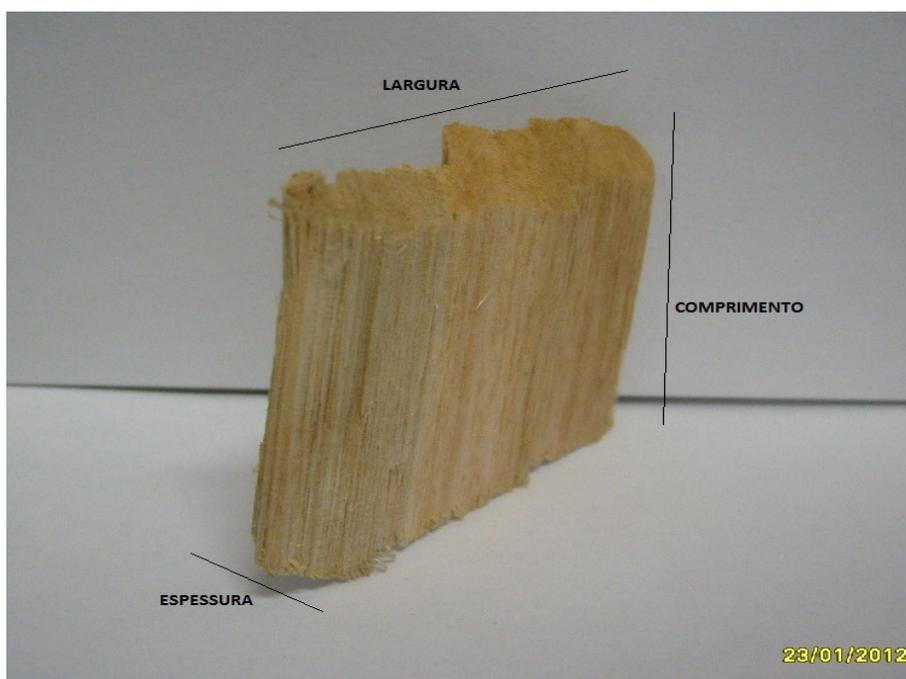


Figura 1- Dimensões do cavaco

### 3.2.4 Determinação da densidade a granel dos cavacos

A determinação da densidade a granel foi realizada através da relação entre o peso dos cavacos secos ao ar (convertido para peso seco utilizando a determinação do teor de umidade) pelo volume do recipiente utilizado na determinação. Para determinar a densidade a granel dos cavacos das frações e controle, utilizou-se uma balança com precisão de 0,01 g e um recipiente com volume de 2380 ml, o qual foi completamente cheio com os cavacos sem compactá-los, e com uma régua padronizou-se a quantidade de cavacos com a capacidade máxima do recipiente. Para cada tratamento foram feitas três repetições. A densidade a granel foi obtida utilizando a Equação 2.

$$Dg = \frac{Ps}{Vr} \quad (2)$$

Sendo:

Dg = densidade a granel dos cavacos, g.cm<sup>-3</sup>;

Ps = peso seco dos cavacos, g;

Vr = volume do recipiente, cm<sup>3</sup>.

### 3.2.5 Determinação da densidade básica dos cavacos

A densidade básica foi determinada de duas maneiras. A primeira utilizando uma pequena porção de cavacos, e a segunda com cavacos individualmente de cada tratamento.

A determinação da densidade básica foi feita com duas repetições de cada tratamento, com aproximadamente 100 gramas de cavacos secos ao ar. Os cavacos foram acondicionados dentro de sacos plásticos com pequenos furos, para permitir a entrada de água sem que os cavacos saíssem, e colocados em um recipiente com água suficiente para cobri-los. Os cavacos permaneceram submersos até a saturação completa.

O volume dos cavacos saturados foi determinado utilizando uma balança com precisão de 0,01 g, onde eles foram pesados de duas maneiras, a primeira imersa em água e a segunda ao ar para determinar o peso úmido dos cavacos. A diferença entre o peso úmido e o peso imerso determina o volume da amostra de cavacos, quando o xilômetro é colocado abaixo da balança. Após a determinação do volume de todos os cavacos dos tratamentos, as amostras foram colocadas na estufa a  $103 \pm 2^\circ \text{C}$  até atingirem peso constante. A densidade básica foi determinada pela relação entre o peso seco e o volume saturado dos cavacos. Este método de determinação da densidade básica é conhecido como método da balança hidrostática norma T 258 om-94 (TAPPI, 1994), e utilizou-se a Equação 3.

$$Db = \frac{Ps}{Pu - Pi} \quad (3)$$

Sendo:

Db = densidade básica dos cavacos,  $\text{g.cm}^{-3}$ ;

Ps = peso seco dos cavacos, g;

Pu = peso úmido dos cavacos, g;

Pi = peso imerso dos cavacos, g.

A determinação da densidade básica individual foi efetuada utilizando 30 cavacos de cada tratamento. Esta amostra foi formada a partir da separação por tamanho de cada fração em três sub-frações com a seguinte escala, cavacos maiores, cavacos intermediários e cavacos menores. Em seguida coletou-se 10 cavacos de cada sub-fração para

a formação da amostra de 30 cavacos. Os cavacos de cada tratamento foram numerados de 1 a 30 e acondicionados dentro de sacos plásticos com furos para permitir a entrada de água. A determinação da densidade básica dos cavacos individuais foi efetuada instalando o xilômetro acima da balança. A utilização deste procedimento significa que o volume imerso é diretamente o volume do cavaco. A densidade básica individual foi determinada utilizando a Equação 4.

$$Db = \frac{Ps}{Pi} \quad (4)$$

Sendo:

Db = densidade básica dos cavacos, g.cm<sup>-3</sup>;

Ps = peso seco dos cavacos, g;

Pi = peso imerso dos cavacos, g.

### 3.2.6 Determinação da composição química dos cavacos

#### 3.2.6.1 Preparação dos cavacos para análises químicas

Os cavacos de cada tratamento foram reduzidos a palitos e em seguida triturados em moinho tipo Wiley. A serragem obtida foi classificada durante 10 minutos em classificador vibratório de peneiras Produtest para a obtenção da fração 40/60 mesh. O teor de umidade da serragem foi determinado conforme a norma T 264 cm-97 (TAPPI, 1997).

#### 3.2.6.2 Solubilidade em hidróxido de sódio (NaOH) 1%

A solubilidade foi determinada utilizando solução de NaOH 1%. Para essa determinação utilizou-se o equivalente a 2,0000 gramas de serragem classificada seca, com duas repetições para cada tratamento. A serragem foi transferida para um erlenmeyer com capacidade de 250 mL, adicionado 100 mL da solução de NaOH e colocados em banho-maria com a água em ebulição. As bocas dos erlenmeyers foram tampadas com vidro de relógio e agitadas manualmente após 10, 15 e 25 minutos a partir do início do procedimento. Após uma hora, as amostras foram filtradas através de cadinhos de vidro sinterizados, previamente

pesados, e toda a serragem do erlenmeyer transferida para o cadinho usando 250 ml de água. Na sequência lavou-se a serragem com 50 ml de ácido acético 10% e novamente com mais 250 ml de água quente. Os cadinhos foram levados para estufa para a secagem e posterior pesagem do material. O procedimento seguiu a norma T 212 om-98 (TAPPI, 1998). A determinação da solubilidade em NaOH foi determinada de acordo com a Equação 5.

$$S1\% = \frac{2,0000 - Ps}{2,0000} \times 100 \quad (5)$$

Sendo:

S1% = solubilidade em NaOH de concentração 1%, %;

2,0000 = peso seco da amostra de serragem, g;

Ps = peso seco da serragem após extração, g.

### 3.2.6.3 Determinação do teor de lignina insolúvel em ácido

O procedimento utilizado seguiu a norma T 222 om-98 (TAPPI, 1998). A determinação foi realizada em duplicata utilizando a serragem classificada 40/60 mesh de cada tratamento. Para cada repetição foi pesado o equivalente a 1,0000 g de serragem seca, e transferida para um sache, onde ficou aprisionada durante a remoção dos extrativos totais. Os saches foram colocados no extrator soxhlet, onde ficaram por 8 horas em contato com o solvente etanol tolueno (1/2), na sequência foi substituído o solvente por etanol e novamente as amostras ficaram em contato com esse solvente por mais oito horas. Em seguida, as amostras foram retiradas do extrator e mergulhadas em água quente por duas horas. Após essas extrações os saches foram secos ao ar para facilitar a retirada da serragem.

A serragem de cada sache foi totalmente retirada e colocada em recipiente com capacidade de 50 mL. Em cada recipiente foi adicionado 15 mL de ácido sulfúrico 72% e colocados em banho termostaticado na temperatura de 20°C durante 2 horas, e realizadas homogeneizações periódicas com bastão de vidro.

Ao final desse procedimento a serragem foi transferida para um erlenmeyer de 1 L, utilizando água destilada até completar o volume para 560 mL. Na sequência, o erlenmeyer foi aquecido e mantido em fervura por 4 horas, durante esse período foi adicionada periodicamente água, para manter constante o nível de 560 ml. Terminado esse

procedimento a amostra ficou em repouso até o dia seguinte, para que a lignina decantasse no fundo do erlenmeyer.

No dia seguinte as amostras foram filtradas em cadinhos de vidro sinterizado de porosidade nº 02 previamente tarados, e utilizada água quente para retirar toda a lignina dos erlenmeyer e também para lavar a lignina. Os cadinhos foram secos em estufa e pesados para determinar a porcentagem de lignina. Para a determinação do teor de lignina utilizou-se a Equação 6.

$$L = \frac{Ps}{1,0000} \times 100 \quad (6)$$

Sendo:

L = teor de lignina na serragem, %;

Ps = peso seco da lignina após tratamento ácido, g;

1,0000 = peso seco da serragem, g.

#### 3.2.6.4 Determinação do teor holocelulose (deslignificação em clorito de sódio)

A determinação foi realizada em duplicata utilizando o equivalente a 2,0000 g de serragem seca e classificada para cada repetição. A serragem pesada foi transferida para o sache, e eles foram submetido aos mesmos procedimentos para extração dos extrativos totais, utilizados para determinação do teor de lignina insolúvel em ácido.

A segunda etapa iniciou com a transferência de toda a serragem de cada sache para um erlenmeyer com capacidade de 125 mL, com o banho-maria na temperatura entre 70 a 80° C, iniciou a adição de 55 mL de água destilada, 3 mL de clorito de sódio (20%) e 2 mL de ácido acético (1/5), nesta ordem em cada recipiente, sendo colocados no banho logo após a adição dos reagentes. Os erlenmeyers foram tampados e a água do banho-maria mantido na altura do nível dos reagentes. A adição dos mesmos reagentes foi repetida por mais três vezes a cada 45 minutos, o período total do procedimento foi de 3 horas. Os reagentes foram homogeneizados logo após cada adição dos reagentes, no final do processo os tratamentos foram imediatamente filtrados em cadinhos previamente pesados, com a utilização de 250 mL de água destilada. Os cadinhos filtrados foram secos na estufa e

pesados para determinar o peso do resíduo. O teor de holocelulose foi determinado utilizando a Equação 7.

$$H = \frac{Ps}{2,0000} \times 100 \quad (7)$$

Sendo:

H = teor de holocelulose na serragem, %;

Ps = peso seco da holocelulose após deslignificação, g;

2,0000 = peso seco da serragem, g.

### 3.2.6.5 Determinação do teor de cinzas

Os procedimentos utilizados seguiram a norma T 211 om-93 (TAPPI, 1993). Nesta determinação foram utilizados cadinhos de porcelana, os quais foram aquecidos em mufla por 30 minutos a temperatura de 600°C, em seguida os cadinhos foram colocados dentro do dessecador para esfriar e registrou-se a tara.

Nos cadinhos pesados foi colocada a serragem classificada retida na peneira de 40 mesh, até aproximadamente 2/3 da sua capacidade. Então, os cadinhos foram levados novamente para a mufla onde permaneceram por quatro horas em temperatura de 600°C. Após a queima completa do material, os cadinhos foram transferidos novamente para o dessecador para esfriarem e em seguida pesados. O cálculo do teor de cinzas foi efetuado utilizando a Equação 8.

$$C = \frac{Psc}{Pss} \times 100 \quad (8)$$

Sendo:

C = teor de cinzas na serragem, %;

Psc = peso seco de cinzas, g;

Pss = peso seco da serragem, g.

### 3.2.7 Polpação Kraft

Os cozimentos dos cavacos foram realizados em digestor laboratorial marca Regmed de capacidade 20 litros. A carga de álcali ativo do primeiro cozimento foi determinada com a realização de dois cozimentos testes, com 500 gramas de cavacos secos do tratamento integrais cada. Os testes serviram para ajustar a deslignificação da celulose para próximo do número kappa 20.

Os cavacos dos tratamentos foram cozidos simultaneamente dentro de cápsulas confeccionadas com tela metálica com orifícios estreitos que permitiam a entrada do licor de cozimento, mas evitaram a saída dos cavacos da menor fração. As cápsulas tinham formato de paralelepípedo e dimensões de: comprimento de 9,5 cm, largura 4,5 cm e espessura 4,5 cm. A massa seca de cavacos acondicionada em cada cápsula foi aproximadamente 40g. Foram utilizados três cápsulas com cavacos para cada tratamento, as quais constituíram as repetições na polpação Kraft.

A utilização das cápsulas possibilitou cozinhar todos os tratamentos no mesmo cozimento, assegurando condições idênticas de temperatura e pressão a todos os tratamentos. Foram realizados três cozimentos com diferentes cargas de álcali ativo base  $\text{Na}_2\text{O}$  (16%, 18% e 20%), sem modificações nas demais condições, sendo elas: Sulfidez = 25%; Relação licor/madeira = 4/1; Temperatura máxima = 170° C; Tempo até temperatura máxima = 90 minutos; Tempo na temperatura máxima = 30 minutos.

#### 3.2.7.1 Rendimento bruto

Depois de cada cozimento as cápsulas foram retiradas do digestor, e colocadas em um recipiente com água para retirar o excesso de licor de cozimento presente nos cavacos. Posteriormente, os cavacos de cada cápsula foram desintegrados em desintegrador marca Regmed a 2000 revoluções. A lavagem, filtração e formação da manta de celulose foram efetuadas em funil de Buchner utilizando papel filtro e bomba de vácuo.

As mantas de celulose foram secas ao ar, picadas manualmente e acondicionadas em saco plástico. Em seguida, cada amostra foi pesada para determinar o peso total da celulose produzida, e coletado uma pequena amostra para a determinação do teor de

umidade. O rendimento bruto de celulose das frações e dos cavacos integrais foi determinado utilizando a Equação 9.

$$RB = \frac{P_{sc}}{P_{sm}} \times 100 \quad (9)$$

Sendo:

RB = rendimento bruto de celulose, %;

P<sub>sc</sub> = peso seco de celulose, g;

P<sub>sm</sub> = peso seco da madeira, g.

### 3.2.7.2 Teor de rejeitos e rendimento depurado

A separação dos rejeitos da celulose de cada amostra foi efetuada em depurador Brecht Roll utilizando peneiras com fendas de 0,2 mm. O teor de rejeitos foi calculado em relação à quantidade de celulose (rejeitos base celulose), utilizando a Equação 10. e também em relação à quantidade de madeira (rejeitos base madeira), utilizando a Equação 11.

$$\text{Rej.b.c} = \frac{P_{srej.}}{P_{sc}} \times 100 \quad (10)$$

Sendo:

Rej.b.c = rejeitos base celulose, %;

P<sub>srej.</sub> = peso seco de rejeitos, g;

P<sub>sc</sub> = peso seco da celulose, g.

$$\text{Rej.b.m} = \frac{P_{srej.}}{P_{sc}} \times RB \quad (11)$$

Sendo:

Rej.b.m = rejeitos base madeira, %;

P<sub>srej.</sub> = peso seco de rejeitos, g;

P<sub>sc</sub> = peso seco da celulose, g;

RB = rendimento bruto de celulose, %.

A partir da determinação do rendimento bruto de celulose (Equação 9) e teor de rejeitos base madeira (Equação 11) foi calculado o rendimento depurado de celulose, conforme Equação 12.

$$RD = RB - \text{Rej.b.m} \quad (12)$$

Sendo:

RD = rendimento depurado de celulose, %;

Rej.b.m = rejeito base madeira, g;

RB = rendimento bruto de celulose, g.

### 3.2.7.3 Determinação do número kappa

Esta determinação foi realizada conforme a norma T 236 om-85 (TAPPI, 1985). O número Kappa é definido como o número de mL de solução de permanganato de potássio 0,1N, consumido por grama de celulose absolutamente seca, sob condições específicas e corrigidas para um consumo relativo de 50% de permanganato.

Para essa determinação foi utilizado o equivalente a dois gramas de celulose depurada seca, e os seguintes reagentes químicos: permanganato de potássio padronizado ( $\text{KMnO}_4$ ) 0,1N; ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 4N; iodeto de potássio (KI) 1N; tiosulfato de sódio padronizado ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) 0,2N e solução de amido 1%.

O procedimento iniciou com a pesagem e desintegração do equivalente a dois gramas secas de celulose, em liquidificador juntamente com 500mL de água. A solução de celulose foi transferida para um Becker de dois litros, e homogeneizada em agitador magnético. Em seguida, foi adicionado 100 mL de  $\text{KMnO}_4$  e 100 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , previamente misturado, e cronometrado 10 minutos. Ao final desse tempo adicionou-se o KI, e em seguida gotas de solução de amido 1%. A titulação foi feita utilizando bureta de 50 mL para dosar a solução de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , a qual foi adicionada até o ponto de viragem para a cor branca. Esse procedimento foi realizado em todas as amostras.

### 3.2.8 Determinação do consumo específico de madeira

O consumo específico de madeira (CEM) é um parâmetro industrial importante, por que com ele é possível estimar o volume de madeira necessário para abastecer a indústria durante um dia ou período de funcionamento. O CEM foi calculado utilizando a Equação 13, e o resultado é o volume de madeira em m<sup>3</sup> necessários para produzir uma tonelada de celulose depurada seca.

$$\text{CEM} = \frac{1}{\text{RD.db}} \times 100 \quad (13)$$

Sendo:

CEM = consumo específico de madeira, m<sup>3</sup>/ton celulose seca;

RD = rendimento depurado, %;

db = densidade básica, g/cm<sup>3</sup>.

### 3.2.9 Classificação das fibras e propriedades físico-mecânicas da celulose

A classificação das fibras e os testes das propriedades físico-mecânicas da celulose foram efetuados na amostra dos cavacos grandes (amostra formada por 166,66 g. a.s. de cavacos das frações um, dois e três), na amostra de cavacos pequenos (amostra formada por 166,66 g. a.s. de cavacos das frações quatro, cinco e seis) e na amostra dos cavacos controle. A polpação Kraft em cada amostra foi efetuada com 500g de cavacos secos nas seguintes condições: álcali ativo como Na<sub>2</sub>O = 18%; sulfidez = 25%; Relação licor/madeira = 4/1; temperatura máxima = 170° C; tempo até temperatura máxima = 90 minutos; tempo na temperatura máxima = 30 minutos.

#### 3.2.9.1 Classificação das fibras da celulose

A classificação por comprimento das fibras na celulose foi efetuada em equipamento *Bauer McNett*. Esse classificador possui cinco tanques posicionados em cascata, cada um equipado com uma peneira, as malhas das peneiras diminuiram do primeiro para o

quinto tanque, essa disposição permite a retenção das fibras com o mesmo intervalo de comprimento em cada tanque. As malhas das peneiras foram: peneira 1 (> 16 mesh), peneira 2 (16 - 30 mesh), peneira 3 (30 - 50 mesh), peneira 4 (50 - 100 mesh), peneira 5 (100 - 200 mesh), os finos que passaram pela peneira 5 foram considerados como < 200 mesh.

Para a classificação foi utilizado o equivalente a 10 gramas de celulose depurada seca, previamente desintegrada a 2000 revoluções. As fibras desintegradas foram colocadas no primeiro tanque e classificadas durante 10 minutos, ao final da classificação de cada tratamento os tanques foram esgotados, lavados e as fibras retidas nos papéis filtro instalados na saída de cada tanques. Em seguida, a celulose coletada em cada tanque foi seca em estufa  $103 \pm 2^\circ \text{C}$ , pesada em balança com precisão de 0,01 g, e calculado o percentual de fibras retidas em cada peneira e a percentagem de finos que passaram pela ultima peneira. Foram efetuadas três repetições para cada amostra.

### 3.2.9.2 Propriedades físico-mecânicas da celulose

A celulose foi refinada em moinho centrífugo Jokro Mühle a 150 rpm e 7000 revoluções. Foram utilizados 16 gramas de celulose depurada seca por panela, com consistência ajustada de 6%. O grau de refino foi avaliado através da determinação do grau Schopper-Riegler SCAN-C19:65 (1964). Foram efetuadas duas repetições para cada amostra de celulose.

Com a celulose refinada de cada repetição confeccionou-se sete folhas de celulose para realização dos ensaios físicos-mecânicos, as folhas foram formadas em aparelho tipo Köthen rapid, com gramatura aproximada  $60\text{g/m}^2$ , e acondicionadas em ambiente climatizado, nas condições de  $50 \pm 2\%$  de umidade relativa e temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  conforme norma T 402 om-93 (TAPPI, 1993).

As propriedades físico-mecânicas avaliadas foram: peso específico aparente T 220 sp-96 (TAPPI, 1996), índice de rasgo T 414 om-98 (TAPPI, 1998), índice de arrebatamento T 403 om-97 (TAPPI, 1997) resistência ao ar T 460 om-96 (TAPPI, 1996) e propriedades de Tração T 494 om-96 (TAPPI, 1996), utilizando as equações abaixo:

$$PEA = \frac{G}{E} \quad (14)$$

Sendo:

PEA = peso específico aparente,  $g/m^2$ ;

G = gramatura,  $g/m^2$ ;

E = espessura,  $\mu m$ .

$$VEA = \frac{E}{G} = \frac{1}{PEA} \quad (15)$$

Sendo:

VEA = volume específico aparente,  $cm^3/g$ ;

E = espessura,  $\mu m$ ;

G = gramatura,  $g/m^2$ .

$$RR = \frac{L.16}{N} . 9,81 \quad (16)$$

Sendo:

RR = resistência ao rasgo, mN

L = Média das leituras, gf;

N = Número de folhas.

$$IR = \frac{RR}{G} \quad (17)$$

Sendo:

IR = índice de rasgo,  $mN.m^2/g$

RR = resistência ao rasgo, mN

G = Gramatura,  $g/m^2$ .

$$RA = P \quad (18)$$

Sendo:

RA = resistência ao arrebentamento, kPa;

P = Pressão média, kPa.

$$IA = \frac{P}{G} \quad (19)$$

Sendo:

IA = índice de arrebentamento, kPa.m<sup>2</sup>/g;

P = pressão média, kPa;

G = gramatura, g/m<sup>2</sup>.

$$RT = \frac{FM}{L} \quad (20)$$

Sendo:

RT = resistência à tração, kN/m;

FM = força máxima, N;

L = largura da tira, mm.

$$IT = \frac{RT \cdot 1000}{G} \quad (21)$$

Sendo:

IT = índice de tração, N.m/g;

RT = resistência à tração, kN/m;

G = gramatura, g/m<sup>2</sup>.

$$AR = \frac{RT \cdot 1000}{G \cdot 9,81} \quad (22)$$

Sendo:

AR = comprimento de auto-ruptura, km;

RT = resistência à tração, kN/m;

G = gramatura, g/m<sup>2</sup>.

$$A = \frac{D}{C} \cdot 100 \quad (23)$$

Sendo:

A = Alongamento, %;

D = Deformação, mm;

C = Comprimento inicial, mm.

$$U = \int_{A=0}^{A=\text{máx.}} RT \, dA / 9,81 \quad U = \text{Trabalho, J}$$

$$U = \int_{A=0}^{A=\text{máx.}} RT \, dA = \text{área sob a curva resistência à tração/alongamento.}$$

$$\text{TEA} = \frac{U \cdot 10^6}{L \cdot C} \quad (24)$$

Sendo:

TEA = energia absorvida na tração, J/m<sup>2</sup>;

U = trabalho, J;

L = largura da tira, mm;

C = comprimento inicial, mm.

$$\text{ITEA} = \frac{\text{TEA}}{G} \quad (25)$$

Sendo:

ITEA = índice de energia absorvida na tração, kJ/kg;

TEA = energia absorvida na tração, J/m<sup>2</sup>;

G = gramatura, g/m<sup>2</sup>.

$$\text{ME} = \frac{\text{FM} \cdot 10^3}{C \cdot A} \quad (26)$$

Sendo:

ME = módulo de elasticidade, MPa;

FM = força máxima, N;

C = comprimento inicial, mm;

A = alongamento, mm.

$$RIT = ME \cdot E \quad (27)$$

Sendo:

RIT = rigidez à tração, kN/m;

ME = módulo de elasticidade, MPa;

E = Espessura da folha, mm.

$$IRIT = \frac{RIT \cdot 10^3}{G} \quad (28)$$

Sendo:

IRIT = índice de rigidez à tração;

RIT = Rigidez à tração, kN/m;

G = Gramatura, g/m<sup>2</sup>.

### 3.2.10 Delineamento experimental

O experimento foi montado no delineamento inteiramente casualizado (DIC), os dados coletados foram submetidos a análise de variância através do teste F nos níveis de 1% e 5% de probabilidade, as determinações que apresentaram comportamentos diferentes foram submetidos ao teste de Tukey de comparação das médias, ao nível de 5% de probabilidade. Os dados coletados no trabalho foram analisados pelo Programa R.

O número de tratamentos variou ao longo das diversas caracterizações realizadas no trabalho, portanto para melhor entendimento agrupou-se os determinações realizadas com o mesmo número de tratamentos em três partes, sendo:

- Tratamentos das dimensões dos cavacos: fração 1; fração 2; fração 3; fração 4; fração 05; fração 06, e Controle.

- Tratamentos caracterizações físicas, químicas e cozimentos: fração 1; fração 2; fração 3; fração 4; fração 05; fração 06, fração 7 e Controle.
- Tratamentos das caracterizações morfológicas e de propriedades físico-mecânicas da celulose: amostra formada com os cavacos grandes (frações um, dois e três), e amostra formada com cavacos pequenos (frações quatro, cinco e seis) e amostra de cavacos controle.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Massas das frações

A Tabela 4 apresenta as massas e as percentagens de cavacos das frações, observa-se que as massas não foram homogêneas, a fração três agrupou a maior quantidade de cavacos, e a fração oito foi a menor. O somatório das três maiores frações, três, quatro e dois respectivamente, correspondeu a 63,84% do total da amostra, portanto, a picagem produziu mais cavacos com dimensões entre essas três frações.

Tabela 4 – Massa e percentagem das frações de cavacos

<b>Frações dos cavacos</b>	<b>Massa seca, g</b>	<b>Percentagem, %</b>
Fração 1 – cavaco grande	804,04	6,0
Fração 2 – cavaco médio 1	2428,82	18,11
Fração 3 – cavaco médio 2	3119,62	23,86
Fração 4 – cavaco médio 3	2932,84	21,87
Fração 5 – cavaco médio 4	1414,79	10,55
Fração 6 – palitos	1532,91	11,43
Fração 7 – nós	1044,48	7,79
Fração 8 – lascas	52,83	0,39
<b>Total</b>	<b>13.410,34</b>	<b>100</b>

A fração um correspondeu a 6% da amostra e parte dela era composta por cavacos muito grandes, esses cavacos podem prejudicar a deslignificação da madeira, porque são normalmente mais espessos e mais difíceis de serem impregnados pelo álcali.

A fração seis representou 11,43% da amostra, a presença desses cavacos revela que o processo de picagem produziu cavacos pequenos e a classificação industrial não conseguiu separar-los. Esses cavacos podem dificultar a circulação do licor de

cozimento em digestores industriais, e reduzir a produtividade industrial devido a menor densidade á granel.

A percentagem de cavacos com nós (fração sete) foi de 7,79%, a madeira com nó é considerada de baixa qualidade para o processo de deslignificação, por que apresenta características físicas e químicas que dificultam deslignificação da madeira. De maneira geral, a madeira com nó produz cavacos com dimensões desuniformes, mais densos, com maior teor de extrativos e lignina e menor teor de holocelulose. O aumento da madeira com nó resulta em maior percentagem de cavacos com nós, e pode prejudicar o rendimento e o grau deslignificação da celulose.

As dimensões dos cavacos podem sofrer alterações durante o processo de picagem influenciadas por vários fatores como: desgaste das facas do picador, mudanças na regulagem do picador, variações na densidade básica da madeira e variação na percentagem de madeira com nó. Essas variações decorrentes do equipamento ou da matériaprima acarretarão oscilações nas dimensões dos cavacos, no entanto, quando ocorrem dentro dos limites não prejudicam a qualidade dos cavacos.

Hartler (1996) apresenta que após o processo de classificação industrial, os cavacos destinados ao processo de produção de celulose devem conter poucos cavacos grandes, no máximo 3% e entre 8-15% de cavacos pequenos (palitos + finos).

A soma das frações um, seis e sete representou 25,22% da amostra, a exclusão dessas frações poderia melhorar a qualidade dos cavacos, mas também acarretaria em uma perda considerável de matéria prima. Por isso, o monitoramento frequente do processo de picagem é uma tarefa importante para aumentar percentagem de cavacos com as dimensões adequadas e diminuir as perdas de matéria prima na etapa de classificação dos cavacos.

## 4.2 Dimensões dos cavacos

### 4.2.1 Estatística descritiva

Na Tabela 5 encontra-se o resumo da análise exploratória das dimensões dos cavacos, onde estão apresentadas duas medidas de posição (média aritmética e

mediana), uma medida de dispersão (coeficiente de variação) e duas medidas de forma (coeficiente de assimetria e coeficiente de curtose).

As médias das dimensões (comprimento, largura e espessura) decresceram da fração um para a fração seis e dentro de cada fração do comprimento para a espessura. Esse comportamento indica a utilização de uma metodologia correta de classificação, pois possibilitou alcançar o objetivo de separar a amostra de cavacos em frações homogêneas e com dimensões diferentes.

Os dados das dimensões dos cavacos não apresentaram comportamento simétrico, portanto foi calculado o coeficiente de assimetria. Os coeficientes de assimetria das frações um, dois, três, quatro, cinco e seis e também do tratamento controle foram positivos nas três dimensões, como pode ser observado na Tabela 5.

O coeficiente de assimetria positivo observado nos tratamentos e nas três dimensões (comprimento, largura e espessura), revelou o maior afastamento dos cavacos maiores do que os cavacos menores em relação à mediana, ou seja, observa-se uma maior variação nas dimensões e menor frequência dos cavacos com dimensões superiores à mediana.

Esse comportamento pode ter relação com o mecanismo de picagem do equipamento, ou pela variação natural da madeira. Twaddle (1997) também observou esse mesmo comportamento assimétrico na distribuição das dimensões em cavacos. Ele estudou a influência do comprimento do cavaco sobre a espessura em diferentes espécies, uma conífera e três folhosas. Os cavacos utilizados no experimento foram produzidos em equipamento hidráulico laboratorial, a partir de pranchas de madeira com três diferentes ângulos de orientação dos anéis de crescimento. O autor observou a tendência de uma ligeira assimetria na distribuição com a cauda estendida em direção aos cavacos com maior tamanho, e um alargamento na distribuição das frações com o aumento do comprimento dos cavacos.

Tabela 5 - Resumo da análise estatística descritiva das dimensões dos cavacos

Tratamentos	Distribuição estatística	Comprimento	Largura	Espessura
Fração 1 cavaco grande	Média, mm*	36,96	36,63	4,96
	Mediana, mm*	34,50	36,00	4,50
	Coefficiente de variação	30,14	23,89	45,11
	Curtose	18,82	0,36	6,32
	Assimetria	3,28	0,43	2,06
Fração 2 cavaco médio 1	Média, mm*	29,83	24,76	3,80
	Mediana, mm*	29,20	24,35	3,80
	Coefficiente de variação	17,80	23,84	28,48
	Curtose	4,57	-0,34	-0,29
	Assimetria	1,62	0,34	0,21
Fração 3 cavaco médio 2	Média, mm*	26,54	16,87	3,14
	Mediana, mm*	26,00	16,50	3,00
	Coefficiente de variação	17,50	23,64	33,12
	Curtose	2,04	0,21	-0,02
	Assimetria	0,94	0,53	0,47
Fração 4 cavaco médio 3	Média, mm*	24,86	11,69	2,77
	Mediana, mm*	24,50	11,00	2,80
	Coefficiente de variação	19,95	26,75	32,81
	Curtose	3,83	1,02	1,00
	Assimetria	0,84	0,86	0,71
Fração 5 cavaco médio 4	Média, mm*	22,68	8,28	2,08
	Mediana, mm*	23,00	8,00	2,00
	Coefficiente de variação	21,37	29,54	36,83
	Curtose	0,99	2,42	1,94
	Assimetria	0,21	1,24	0,98
Fração 6 palitos	Média, mm*	18,72	3,87	1,18
	Mediana, mm*	19,20	3,80	1,10
	Coefficiente de variação	33,52	59,15	62,79
	Curtose	0,94	1,90	3,37
	Assimetria	0,47	1,10	1,32
Cavaco Controle	Média, mm*	23,42	9,08	2,13
	Mediana, mm*	22,70	7,85	1,95
	Coefficiente de variação	32,65	69,68	55,56
	Curtose	26,69	0,73	-0,11
	Assimetria	3,29	1,05	0,61

mm\*= Milímetros.

A Tabela 5 também mostra os valores do coeficiente de curtose das frações um, dois três, quatro, cinco, seis e do tratamento controle, o comprimento não possuiu valores negativos, no entanto a largura apresentou um e a espessura três valores negativos. Os valores negativos observados nas frações dois, três e no tratamento controle apontam a existência de um nivelamento na distribuição da frequência, a distribuição das frequências relativa e acumulada das frações está apresentada na Figura 2. A fração dois foi à única que apresentou duas dimensões (largura e espessura) com curtose negativa e baixos coeficientes de variação, portanto a mais homogênea.

Na Tabela 5 observamos que as frações um, seis e o tratamento controle apresentaram altos coeficientes de variação nas três dimensões, enquanto os outros tratamentos tiveram índices menores. Nesses tratamentos o coeficiente de variação teve tendência de aumento no sentido do comprimento para a espessura dos cavacos.

O aumento do Coeficiente de variação do comprimento para a espessura pode ter relação com o maior controle do processo de picagem sobre o comprimento dos cavacos, e a maior fragilidade de ruptura por cisalhamento dos cavacos na seção longitudinal, portanto a largura e a espessura dos cavacos são as dimensões mais susceptíveis a quebras pelos choques no picador, no transporte e durante a classificação.

Hartler (1986 apud HARTLER, 1996) apresenta como 20% um nível normal do coeficiente de variação para o comprimento dos cavacos, ele comenta que picadores que produzam cavacos com variação acima deste nível estão trabalhando abaixo das condições ideais.

Costa (2011) estudou os cavacos obtidos através da picagem de cinco árvores com 6 anos de idade do híbrido das espécies *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Das amostras de cada árvore foram retirados manualmente os finos, cascas e os nós grandes, e no laboratório os cavacos foram classificados em classificador de peneiras com objetivo de obter cavacos com espessura entre 4 e 6 milímetros. Das amostras classificadas foram utilizados 250 gramas de cavacos para determinar as dimensões com paquímetro. Os cavacos apresentaram as seguintes dimensões médias: comprimento 20,62 mm, largura 11,50 mm e espessura 3,15 mm e coeficientes de variação de 22,26 %, 41,63 % e 32,60% respectivamente.

Twaddle (1997) encontrou em experimento sobre a influência do comprimento dos cavacos sobre a espessura o coeficiente de variação da espessura dos cavacos entre 20,8% a 28,3%.

O maior coeficiente de variação do tratamento controle pode ser atribuído à baixa eficiência da classificação industrial e ausência da classificação manual, no entanto as frações um e seis foram classificadas manualmente, mas também apresentaram altos coeficientes. As frações um e seis foram às únicas que tiveram o tamanho máximo ou o tamanho mínimo dos cavacos delimitado pelo processo de classificação industrial.

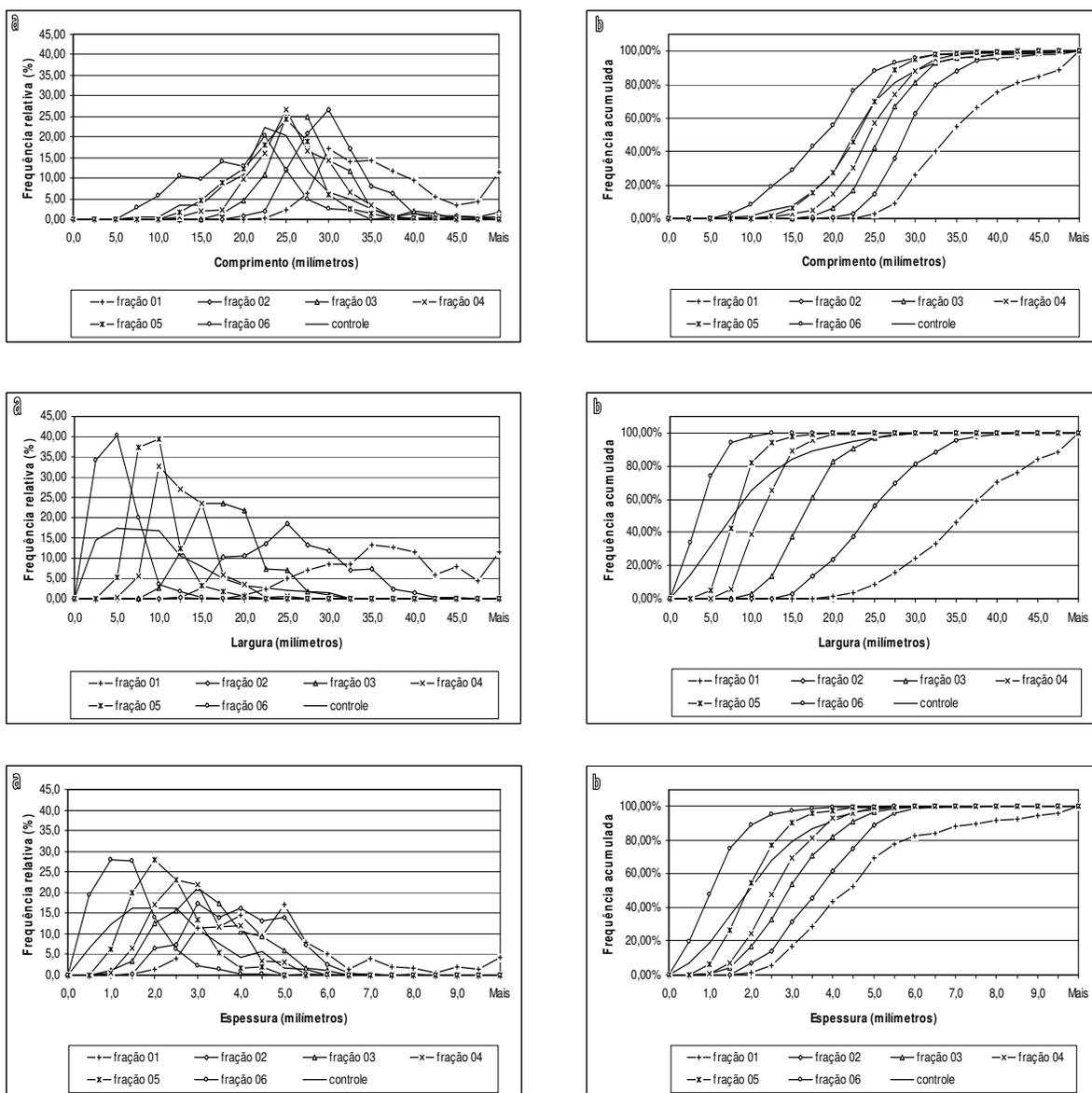


Figura 2 - Distribuições da frequência relativa (a) e frequência acumulada (b) das dimensões dos cavacos das frações e controle.

Esses resultados mostram que o processo de classificação industrial dos cavacos foi ineficiente, porque não conseguiu separar todos os cavacos muito grandes nem todos os cavacos muito pequenos, e prejudicou a homogeneidade do tratamento controle e das frações um e seis.

#### 4.2.2 Média das dimensões

A Figura 3 apresenta os valores médios do comprimento (a), largura (b) e espessura (c) dos cavacos das frações um, dois, três, quatro, cinco e seis e do tratamento controle. Nas três dimensões estudadas houve diferença estatística entre as frações, e o tratamento controle foi estatisticamente igual à fração cinco.

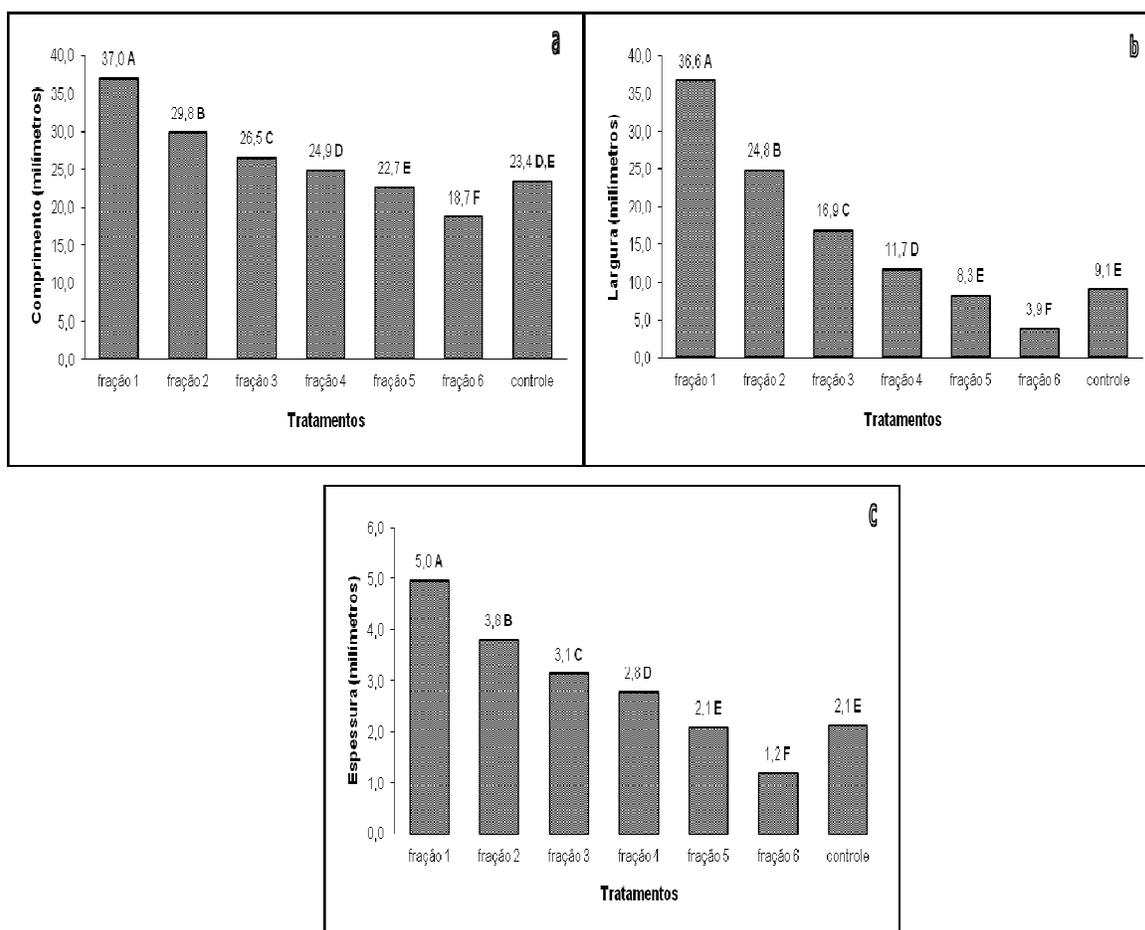


Figura 3 - Médias das dimensões (a) comprimento, (b) largura e (c) espessura dos cavacos dos tratamentos. As médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% de probabilidade

As três frações com maiores percentagens de cavacos apresentaram as dimensões médias dos cavacos dentro da faixa considerada adequada, o comprimento variou de 29,8 a 24,9 mm, a largura de 24,8 a 11,7 mm e a espessura de 3,8 a 2,4 mm. As frações um

e seis tiveram a média de uma dimensão fora dos limites, à fração um apresentou a média do comprimento de 37 milímetros e a fração seis a média da espessura de 1,2 milímetros.

A Figura 3 também mostra a existência de uma relação entre as três dimensões dos cavacos, a qual pode ser percebida pela redução simultânea das três dimensões com a diminuição do tamanho das frações.

O comprimento dos cavacos apresentou as maiores médias, pequenas diferenças entre elas e o menor coeficiente de variação, ou seja, essa dimensão dos cavacos apresentou maior uniformidade, esse comportamento pode ser explicado por que o comprimento é única dimensão dos cavacos controlada diretamente pelo corte do picador.

A largura é a segunda maior dimensão dos cavacos, mas raramente foi mencionada nos livros e trabalhos científicos consultados. A largura interfere menos que as outras duas dimensões nos processos de impregnação e deslignificação, por isso, a sua importância para a qualidade dos cavacos é menor, a ponto de não ser encontrado nas consultas o intervalo ideal do tamanho dessa dimensão.

Na figura 3 observa-se também que a largura dos cavacos apresentou a maior diferença entre as médias das frações, característica que pode facilitar a separação dos cavacos em frações mais homogêneas. Essa diferença é observada visualmente, e torna-se mais notória quando subtraímos a média da maior fração pela média da menor fração, os resultados das três dimensões foram: comprimento 18,8 milímetros, largura 32,7 milímetros e a espessura 3,8 milímetros. Por isso, a largura pode ser a dimensão capaz de separar os cavacos mais facilmente em intervalos mais homogêneos.

A espessura é a menor dimensão dos cavacos, no entanto, ela é considerada a mais importante para a polpação Kraft, porque os processos de impregnação e a deslignificação são mais dependentes desta dimensão (MIMMS et al. 1993). As frações um, dois, três, quatro e cinco apresentaram espessuras médias adequadas e a fração seis abaixo da desejada.

O tratamento controle apresentou as médias das três dimensões dentro dos limites adequados, comprimento 23,42 milímetros, largura 9,08 e espessura 2,13 milímetros. A metodologia utilizada pode ter subestimado as dimensões dos cavacos desse tratamento, devido à alta variação no tamanho dos cavacos e a pequena quantidade de cavacos mensurada.

As frações um e seis poderiam não ser utilizadas para a produção de celulose, por que apresentaram uma das dimensões fora dos limites recomendados. No entanto, a exclusão dessas frações também aumentaria a perda de matéria prima, uma vez que estas duas frações corresponderam a 19,22% da amostra de cavacos.

#### 4.3 Densidade a granel dos cavacos

A Figura 4 mostra a média da densidade a granel dos cavacos das frações um, dois, três, quatro, cinco, seis, sete e do tratamento controle. A densidade a granel apresentou diferença estatística entre os tratamentos, a fração sete teve a maior densidade à granel, seguida pelas frações dois, três, quatro e cinco, e a fração seis apresentou a menor média entre os tratamentos. A fração sete apresentou a maior densidade a granel devido à alta densidade básica da madeira com nó.

A umidade, densidade básica e a dimensões dos cavacos podem influenciar na densidade a granel dos cavacos. Entretanto a maior densidade a granel observada nas frações dois, três, quatro e cinco pode ter sido influenciada pela homogeneidade das dimensões dos cavacos dessas frações.

A baixa densidade a granel da fração seis pode ser explicada pela baixa densidade básica, menor dimensões dos cavacos e desuniformidade dos cavacos. O tratamento controle apresentou a mesma densidade a granel da fração cinco, mas foi diferente das frações dois, três, e quatro. Portanto, a densidade a granel do tratamento controle pode ter sofrido influência da desuniformidade das dimensões.

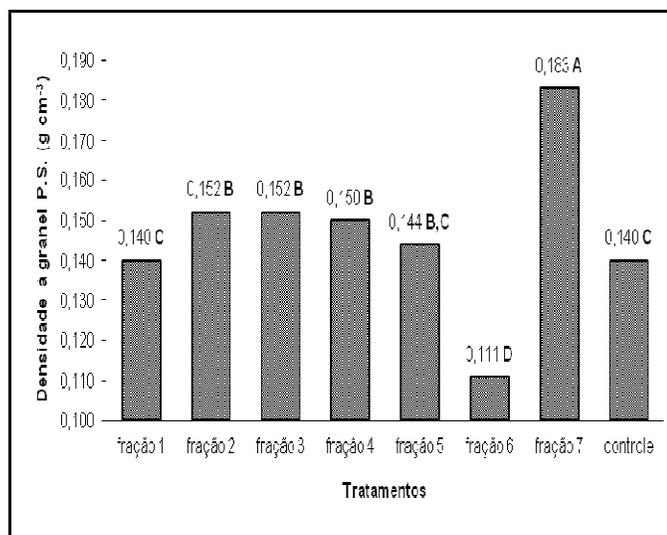


Figura 4 - Densidade a granel dos cavacos das frações e controle. As médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% de probabilidade.

#### 4.4 Relações entre as dimensões dos cavacos

A Figura 5 mostra as médias das relações comprimento/largura e comprimento/espessura dos cavacos das frações um, dois, três, quatro, cinco, seis e do tratamento controle. As frações um, dois, três e quatro tiveram as relações comprimento/espessura iguais, e as frações um, dois e três a mesma relação comprimento/largura, também se observa o aumento das duas relações com a diminuição do tamanho das frações, e que o tratamento controle apresentou as relações diferentes das frações.

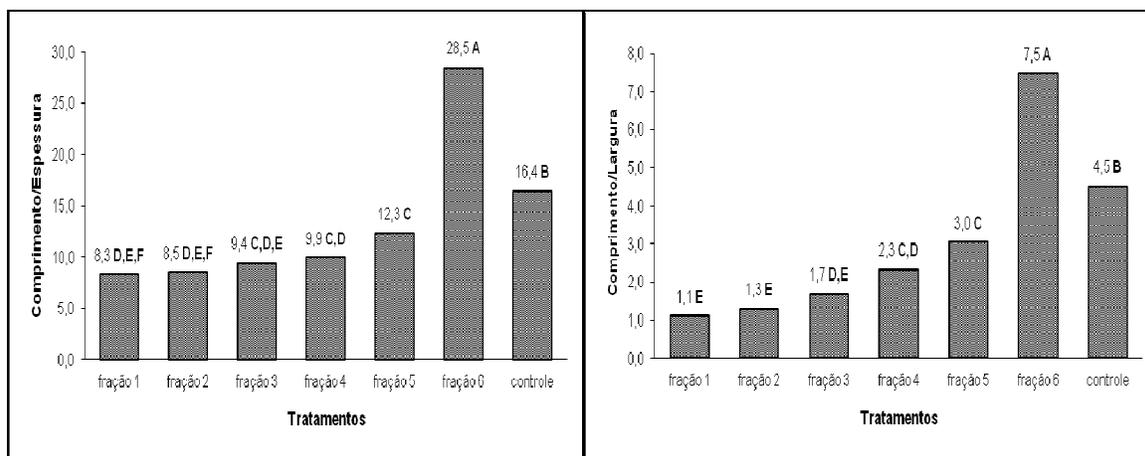


Figura 5 - Relação comprimento/largura e relação comprimento/espessura dos cavacos. As médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% de probabilidade

As relações comprimento/espessura e comprimento/largura podem servir como mais um parâmetro para atestar a qualidade dos cavacos, por que indica modificações no formato dos cavacos. A forma dos cavacos sofreu modificações com a diminuição do tamanho das frações, ou seja, a fração um teve cavacos mais largos e espessos, e a fração seis cavacos mais estreitos e finos (palitos).

O formato dos cavacos pode influenciar na acomodação deles em um determinado recipiente, cavacos bem acomodados terão menos espaços vazios entre eles e conseqüentemente mais espaço será ocupado pela madeira, podendo aumentar a produtividade do digestor.

A análise da relação entre as duas maiores dimensões mostra que fração um teve a média próxima de 1, e cavacos com formato quase quadrangular, as frações dois, três, quatro e cinco apresentaram relação variando de 1,3 a 3,0 e os cavacos com formato retangular, e a fração seis teve a relação mais alta e os cavacos com o formato de palitos.

As relações entre as dimensões parecem ser menos importantes para a acomodação dos cavacos do que as dimensões e a homogeneidade das frações. Observa-se na figura 5 que as relações das duas primeiras frações foram iguais, mas apresentaram densidades a granel diferentes, esse comportamento pode ser causado pela diferença das dimensões e da variabilidade dessas frações.

Os cavacos da fração um apresentaram as maiores dimensões, grande variação do tamanho e algumas partículas com dimensões anormais, essas características atrapalham a acomodação dos cavacos. Os cavacos grandes quando mal acomodados formam grandes bolsas de espaços vazios ao seu redor, e contribuem para reduzir a densidade a granel.

A fração seis apresentou altas relações comprimento/espessura e comprimento/largura, os cavacos dessa fração apresentaram formato de palitos devido ao grande comprimento e pequena largura e espessura. Além das altas relações também tiveram as menores dimensões, alta variabilidade das dimensões e baixa densidade básica, características que contribuem para redução da densidade a granel.

As frações um, dois, três, quatro e cinco apresentaram diferenças entre as relações comprimento/espessura e comprimento/largura, e também das dimensões, mas apresentaram a mesma densidade a granel. Portanto, a homogeneidade dos cavacos pode ter maior influência na densidade a granel dos cavacos que as relações e as dimensões dos cavacos.

Na figura 5 observa-se que as frações dois e três apresentaram os maiores valores numéricos da densidade a granel, essas frações também foram às mais homogêneas (menores coeficientes de variação), portanto a acomodação dos cavacos foi influenciada pela homogeneidade das frações.

#### 4.5 Densidade básica dos cavacos

A Figura 6 mostra os valores médios da densidade básica e densidade básica individual dos cavacos das frações e do tratamento controle, houve comportamento estatístico diferente entre as duas determinações. Apenas na determinação da densidade básica a fração seis foi igual às frações dois, três, quatro, cinco e tratamento controle, e a fração sete igual à fração um.

A Figura 6 mostra a tendência de redução da densidade básica com a diminuição no tamanho dos cavacos, e a fração seis apresentou a menor densidade. Também se observa que a fração sete apresentou as maiores médias, esse comportamento é decorrente da menor porosidade e dos maiores teores extrativo da madeira com nó, características que dificultam a impregnação dos cavacos pelo licor de cozimento.

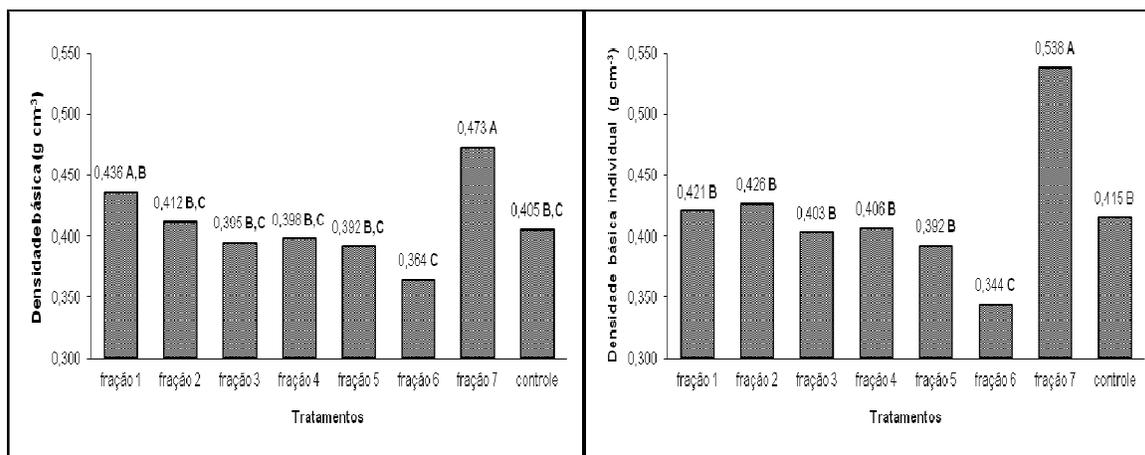


Figura 6 - Densidade básica e densidade básica individual dos cavacos das frações e controle. As médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% de probabilidade.

Entre os gráficos da Figura 6 percebeu-se maior variação numérica das médias das frações seis e sete. Essas diferenças podem ter ocorrido devido à variação natural da madeira, mas também pela existência de uma maior variabilidade das características físicas dessas duas frações. Para compreender melhor essas diferenças alguns parâmetros foram calculados usando os resultados da determinação da densidade individual dos cavacos.

Na Tabela 6 estão apresentadas as densidades básicas mínima, média e máxima, os intervalos entre as densidades mínima e máxima, e os coeficientes de variação, bem como a porosidade mínima, média e máxima, e as variações entre a porosidade mínima e máxima dos cavacos dos tratamentos.

Tabela 6 - Densidade básica individual e porosidade dos cavacos

Parâmetros	Frações de cavacos							Controle
	1	2	3	4	5	6	7	
Dens. máxima, g.cm <sup>-3</sup>	0,506	0,499	0,486	0,459	0,476	0,500	0,652	0,556
Dens. mínima, g.cm <sup>-3</sup>	0,378	0,383	0,339	0,358	0,250	0,167	0,435	0,333
Dens. média, g.cm <sup>-3</sup>	0,421	0,426	0,403	0,406	0,392	0,344	0,538	0,415
Intervalo máx. e min. g.cm <sup>-3</sup>	0,128	0,115	0,146	0,099	0,226	0,333	0,217	0,222
C. V, %*	7,40	7,18	10,31	6,96	13,67	21,17	9,81	11,46
Porosidade máxima,%	75,29	74,97	77,84	76,60	83,66	89,08	71,57	78,24
Porosidade mínima,%	66,93	67,39	68,24	70,00	68,89	67,32	57,39	63,66
Porosidade média, %	72,52	72,16	73,66	73,46	74,38	77,52	64,84	72,88
Varição máx. e min.,%	8,37	7,58	9,61	6,60	14,77	21,76	14,18	14,58

\*coeficiente de variação em percentagem; Dens. = densidade básica.

Na Tabela 6 observa-se que a densidade básica máxima dos cavacos das frações variou pouco entre as frações um, dois, três, quatro, cinco e seis, mas a densidade mínima foi semelhante apenas nas quatro primeiras frações. As quatro primeiras frações de cavacos apresentaram densidade básica mínimas maior que  $0,300 \text{ g.cm}^{-3}$ , e as frações cinco e seis apresentaram os valores de  $0,250 \text{ g.cm}^{-3}$  e  $0,167 \text{ g.cm}^{-3}$ , respectivamente.

Esse comportamento pode explicar a tendência de redução da densidade básica dos cavacos da fração cinco e a menor densidade básica dos cavacos da fração seis. E indicar que os cavacos com dimensões abaixo de 22,7 milímetros de comprimento, 8,3 milímetros de largura e 2,1 milímetros de espessura podem apresentar cavacos com baixa densidade básica.

A redução na densidade mínima refletiu na densidade média e aumentou a variação da densidade básica nessas frações. Alta variação de densidade básica entre os cavacos pode causar desuniformidade na impregnação e na deslignificação dos cavacos. A causa da baixa densidade mínima de alguns cavacos das frações cinco e seis pode ser explicada pelas menores dimensões e pela anatomia da madeira. Quanto menor o cavaco maior a vulnerabilidade da partícula as variações naturais da madeira.

Observa-se que a fração seis, tratamento controle, fração cinco e fração sete, respectivamente, apresentaram os maiores intervalos, ou seja, os cavacos dessas frações apresentaram maior variação da densidade em relação aos demais tratamentos.

A Tabela 6 também mostra que a fração seis apresentou as menores densidades médias e mínimas, e maior percentual de porosidade média. Esse comportamento pode ser justificado pela menor densidade básica média dessa fração, quanto menor a densidade básica menos substância madeira e maior quantidade de espaços vazios do cavaco.

Costa (2006) estudou as características físico-energéticas da madeira de *Eucalyptus grandis* e concluiu que a retratibilidade teve a mesma variação da densidade e a porosidade variação inversa à da densidade.

A variação da porosidade dos cavacos foi menor nas frações um, dois, três e quatro e maior nas frações cinco, seis, sete e controle, As frações cinco e seis apresentaram maior quantidade de espaços vazios dentro dos cavacos, o que pode ser explicado pela tendência de redução da densidade básica com a diminuição no tamanho da fração.

A maior variabilidade observada nas frações com as menores dimensões pode ser ocasionada por variações anatômicas da madeira, pois quanto menor o cavaco maior sua sensibilidade a variações da madeira.

#### 4.6 Composição química dos cavacos

A Tabela 7 mostra os valores médios dos teores de extrativos totais, solubilidade em NaOH 1%, holocelulose, lignina e cinzas, dos cavacos das frações um, dois, três, quatro, cinco seis, sete e do tratamento controle.

Os cavacos da fração sete apresentaram a maior percentagem de extrativos totais, solubilidade em NaOH 1%, e lignina e a menor percentagem de holocelulose. Essas características da madeira são desfavoráveis para o processo de produção de celulose, porque aumenta o consumo do licor de cozimento e diminui o rendimento.

Os extrativos são formados por um conjunto de componentes químicos que tem a função de aumentar a resistência da madeira contra o ataque de pragas e doenças, durante a polpação esses compostos acabam consumindo parte dos reagentes do licor de cozimento desfavorecendo o processo de deslignificação.

Os cavacos das frações um, dois, três, quatro, cinco e o tratamento controle apresentaram os teores de extrativos totais, solubilidade em NaOH 1%, lignina e cinzas estatisticamente iguais. Os cavacos da fração seis tiveram o maior teor de holocelulose e os menores teores de extrativos totais e solubilidade em NaOH 1%. O aumento do teor de holocelulose dos cavacos da fração seis não foi acompanhado pela redução do teor de lignina.

O teor de holocelulose é o somatório dos teores de celulose e hemicelulose existente na amostra. Amostras com maior teor de holocelulose nem sempre apresentam maiores rendimentos, por que elas podem conter mais hemiceluloses que celulose e sofrer maior degradação durante o cozimento da madeira (MIMMS et al., 1993).

Machado et al. (1988) estudaram a composição química da madeira de duas espécies, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus pilularis*, os autores determinaram o teor de holocelulose pelo método do hipoclorito de sódio. A madeira de *E. grandis* apresentou o teor de holocelulose de 76,80% e a madeira de *E. pilulares* o teor de holocelulose foi de 80,17%, valor também acima dos normalmente encontrados em madeira do gênero *Eucalyptus*.

Silva et al. (2005) estudaram a composição química da madeira proveniente de árvores *Eucalyptus grandis* com 10, 14, 20 e 25 anos de idade, os autores coletaram discos amostrados na base, três e seis metros de altura, observou-se que o teor de lignina aumentou com a idade da árvore, o teor de holocelulose diminuiu com a idade e aumentou com a altura do disco, e o teor de extrativos totais aumentou com a idade e os maiores teores foram encontrados nos discos da base (SILVA et al., 2005).

Santana et al. (2012) estudou o efeito da idade e do diâmetro das toras na composição química da madeira. No trabalho determinaram-se os teores de holocelulose, lignina total, extrativos totais e cinzas, da madeira de *Eucalyptus grandis* com 34, 48, 61, 74 e 86 meses de idade, com diferentes classes diamétricas. O autor concluiu que a classe diamétrica não influenciou significativamente os teores de holocelulose e lignina total. A idade influenciou significativamente os teores de lignina total, extrativos totais e cinzas, exceto o teor de holocelulose.

Tabela 7. Composição química dos cavacos

Parâmetros		Extrativos totais (%)	NaOH 1%, (%)	Holocelulose, (%)	Lignina, (%)	Cinzas (%)
Fração 1	Média	2,52 C	10,92 BCD	83,38 BC	22,13 B	0,32 AB
	C.V.	3,08	0,38	0,03	1,25	2,15
Fração 2	Média	2,32 C	10,78 CD	83,65 BC	22,26 B	0,28 B
	C.V.	4,88	0,19	0,50	2,80	7,18
Fração 3	Média	3,08 B	11,63 B	83,10 BC	21,87 B	0,30 AB
	C.V.	0,23	0,35	0,48	0,26	4,27
Fração 4	Média	1,99 CD	10,41 DE	83,78 BC	22,18 B	0,28 B
	C.V.	5,32	1,83	0,18	1,15	3,79
Fração 5	Média	2,47 C	10,70 CD	84,07 AB	21,66 B	0,29 AB
	C.V.	2,57	0,71	0,06	2,02	0,42
Fração 6	Média	1,54 D	09,94 E	85,01 A	22,03 B	0,31 AB
	C.V.	0,46	2,29	0,61	0,22	7,62
Fração 7	Média	4,73 A	14,40 A	80,32 D	24,16 A	1,60 A
	C.V.	7,32	2,17	0,06	1,32	58,86
Controle	Média	2,32 C	11,26 BC	82,89 C	22,16 B	0,28 B
	C.V.	1,83	2,24	0,15	0,96	5,10

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% de probabilidade.

#### 4.7 Polpação Kraft

A Figura 7 apresenta as médias do rendimento bruto, rendimento depurado, nas três condições de cozimento. Observa-se tendência de redução dos rendimentos com o aumento da carga de álcali ativo de 16% para 20%, em todos os tratamentos. Esse comportamento era esperado, porque o aumento da carga de hidróxido de sódio e sulfeto de sódio torna a condição do cozimento mais drástica, conseqüentemente aumenta a deslignificação e também a degradação dos polissacarídeos.

A celulose dos cavacos da fração sete apresentou o menor rendimento depurado nas três condições, os demais tratamentos não apresentaram diferenças significativas entre si, mas observa-se que as celuloses dos cavacos das frações quatro e cinco apresentaram os maiores valores de rendimento depurado nas três condições. Gouvea et al., (2009) também encontrou pequenas variações no rendimento depurado, em experimento com seis clones de Eucalipto sendo duas espécies de *Eucalyptus grandis* e 3 híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, todos com 3 anos de idade e oriundos de 4 locais diferentes do estado de Minas Gerais. No cozimento Kraft foi utilizada carga de álcali fixo de 18,4% e 250 gramas de cavacos secos, o rendimento depurado variou de 50,3% a 52,9%.

O menor rendimento depurado da celulose dos cavacos da fração sete é consequência das piores características físicas e químicas da madeira de nó. Os cavacos da fração sete tiveram alta densidade básica, alto teor de extrativos e lignina e baixo teor de holocelulose, esses resultados contribuíram para redução do rendimento e da deslignificação.

Os cavacos com nós produziram celulose com rendimento depurado de 44,12%, no cozimento com 18% de álcali ativo, apesar do menor rendimento superou as expectativas. O rendimento dos cavacos com nós pode estar ligado à percentagem da área do cavaco ocupada pela madeira com nó, quanto menor o volume do nó maior a proporção de madeira livre de nó do cavaco. Além disso, a celulose produzida com os cavacos da fração sete também foi menos deslignificada. A exclusão dos cavacos com nós pode melhorar o rendimento e a deslignificação, mas também desperdiçará a madeira livre de nós existente nos cavacos.

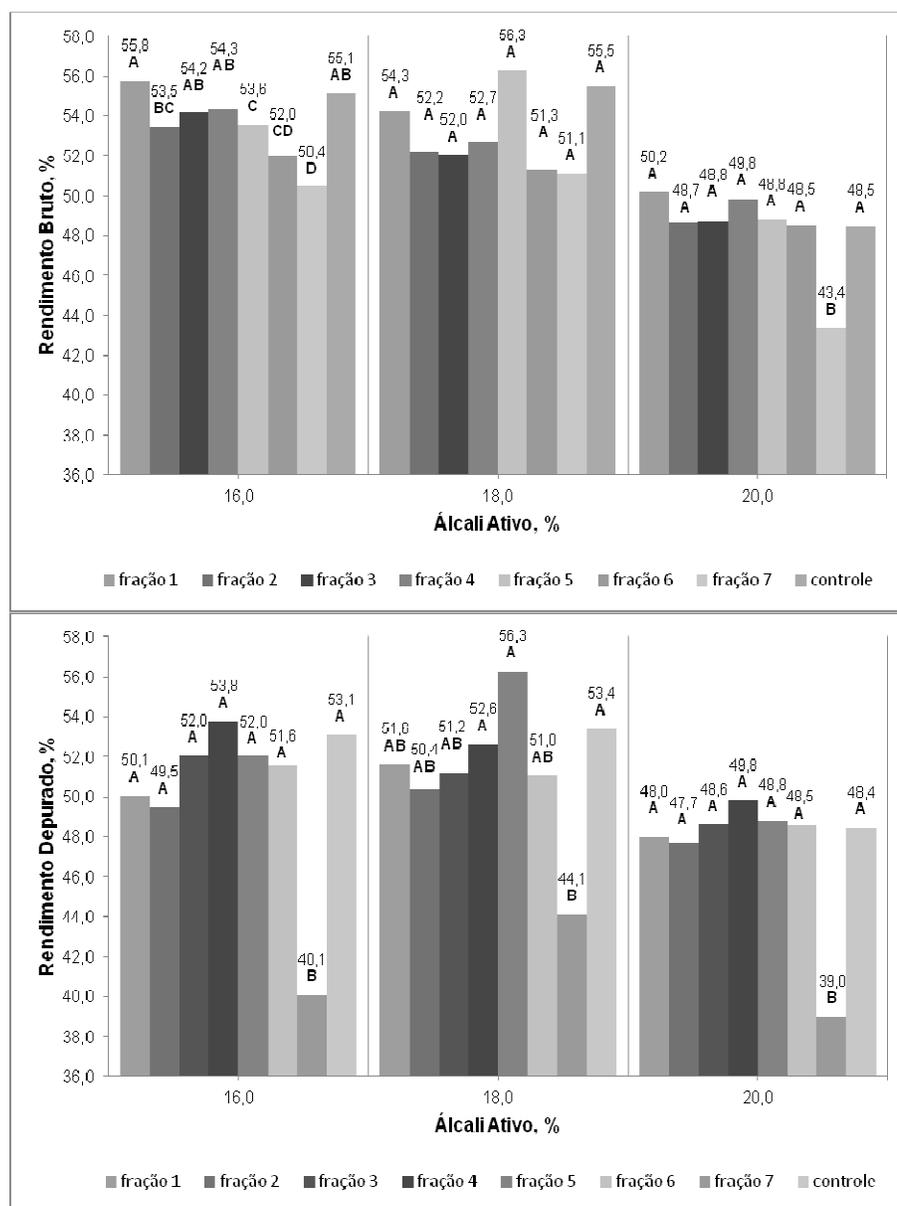


Figura 7 – Rendimento bruto e rendimento depurado dos cavacos das frações e controle. As médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% de probabilidade, na mesma percentagem de álcali ativo.

A Figura 8 mostra as percentagens de rejeitos base madeira e base celulose dos tratamentos, houve redução do teor de rejeitos dos tratamentos com a elevação da carga de álcali ativo. A fração sete teve a maior percentagem de rejeitos, e os demais tratamentos não apresentaram diferenças estatísticas entre si. No entanto, houve tendência de redução do teor de rejeitos com a diminuição do tamanho dos cavacos.

Ingruber et al. (1985) encontraram grande efeito da espessura dos cavacos sobre o teor de rejeitos da polpação alcalina, os cavacos com espessura de 3 mm apresentaram o melhor comportamento.

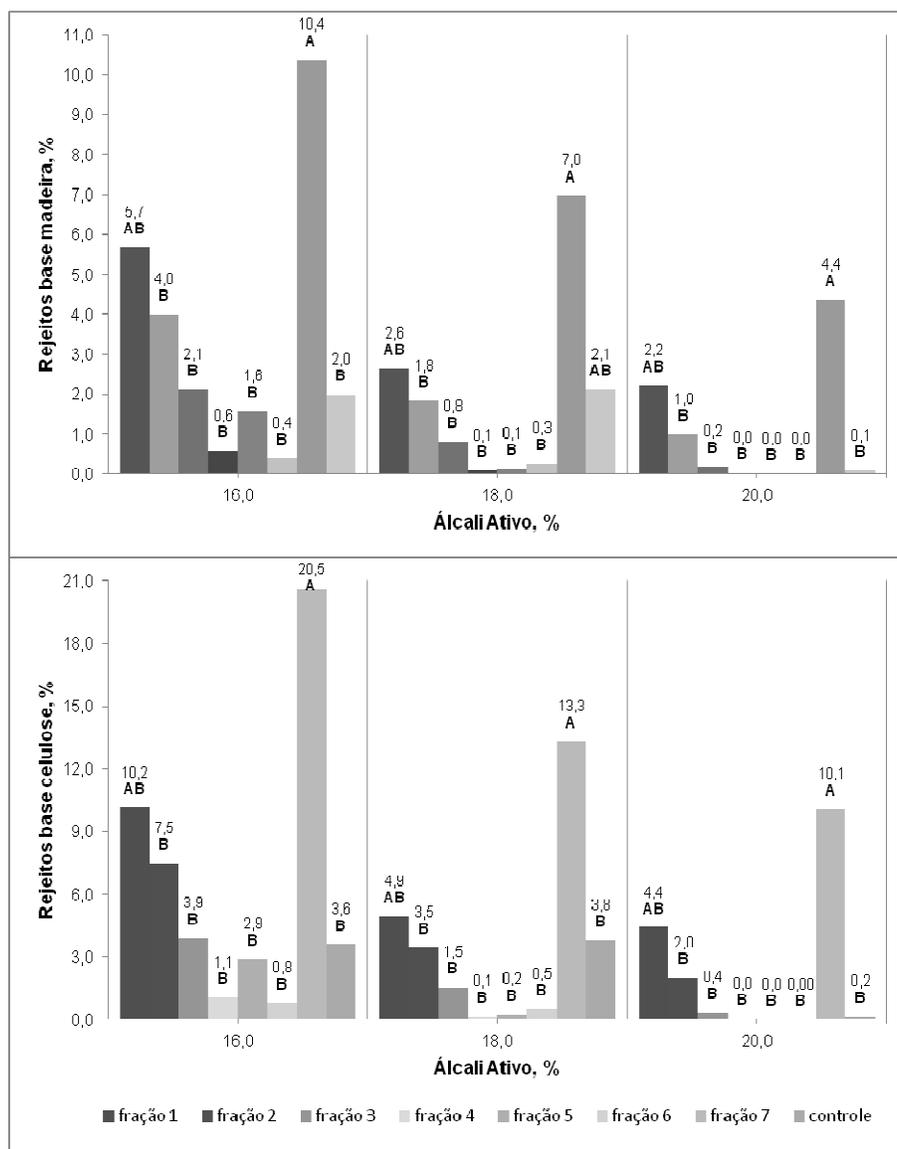


Figura 8 – Rejeitos base madeira e base celulose dos cavacos das frações e controle. As médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% de probabilidade, na mesma percentagem de álcali ativo.

A figura 9 apresenta os resultados das determinações do número Kappa e do consumo específico de madeira para produção de uma tonelada de celulose depurada seca. O número Kappa diminuiu com o aumento da concentração de álcali ativo e

com a diminuição das dimensões dos cavacos, a celulose dos cavacos da fração sete apresentou os maiores números kappa nas três condições de cozimento, variando de 24,8 a 30,56, valores bem acima do número Kappa 18 praticado nos cozimentos industriais, quanto maior o número Kappa significa mais lignina residual na celulose, e maiores os custos para o branqueamento das fibras.

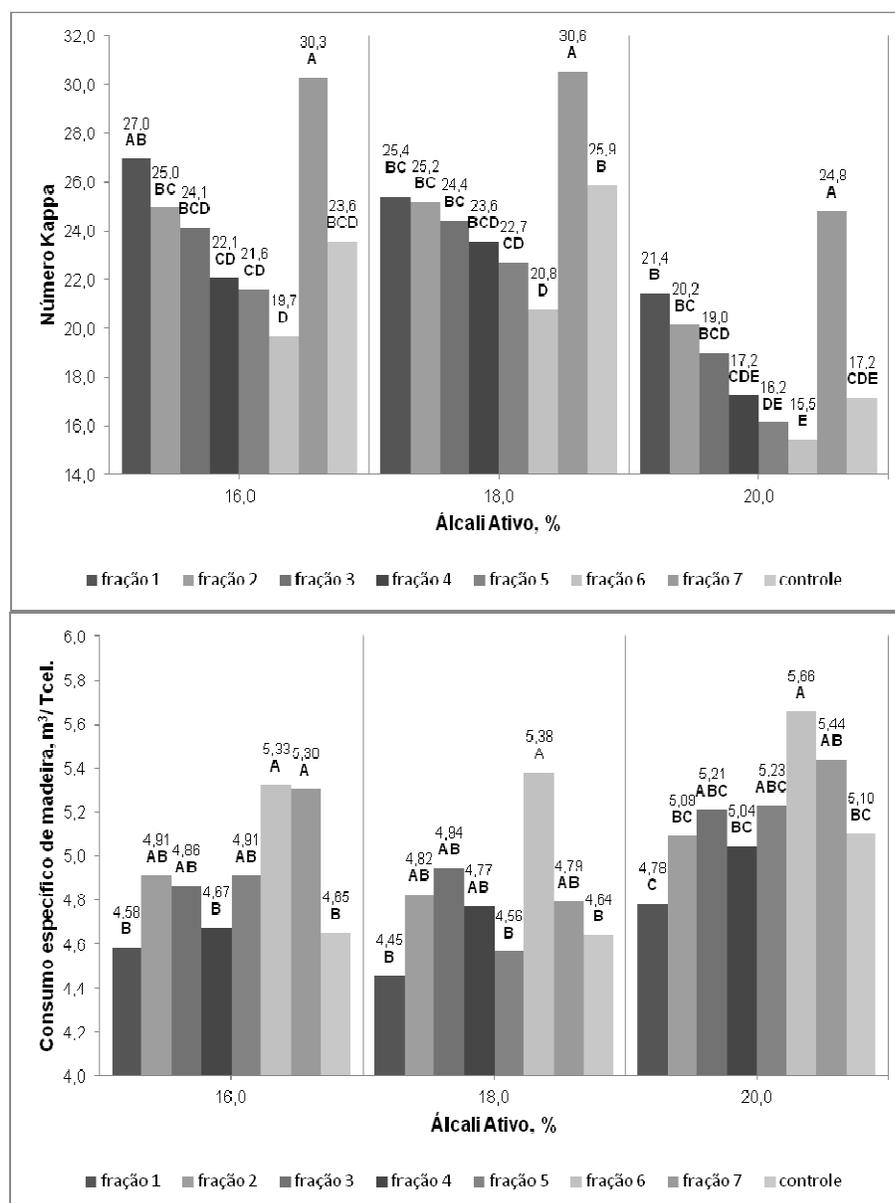


Figura 9 – Número kappa e consumo específico de madeira das frações de cavacos e controle. As médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% de probabilidade, na mesma percentagem de álcali ativo.

O consumo específico de madeira também apresentou diferenças entre os tratamentos, observa-se que o consumo específico de madeira aumentou com a elevação da concentração de álcali ativo. Além disso, percebe-se a necessidade de mais madeira de cavacos pequenos para produzir uma tonelada, em relação aos cavacos grandes.

As dimensões dos cavacos influenciaram na redução do número Kappa. Esse comportamento pode estar relacionado à tendência de redução da densidade básica, dos extrativos, da espessura dos cavacos, e aumento da porosidade, características que facilitam a impregnação do licor de cozimento e favorecem a deslignificação.

Couto (1979) trabalhou com várias dimensões de cavacos da madeira de *Eucalyptus urophylla*, e analisou sua influência sobre o rendimento e a qualidade da celulose. Ele concluiu que os cavacos com espessura inferior a 2 mm apresentaram altos rendimentos depurados, associados à facilidade de deslignificação, e existir a possibilidade de otimizar a produção de celulose utilizando tipos de cavacos e condições específicas de cozimento.

Mas os cavacos muito curtos e estreitos também podem ocasionar problemas práticos na fábrica de celulose, como a redução da densidade a granel no digestor, o aumento da quantidade de finos durante a picagem, características indesejáveis para a circulação do licor no digestor, e para as propriedades de resistência da polpa. Portanto, vários fatores devem ser considerados para determinar a espessura apropriada dos cavacos (GRACE et al., 1989a).

Com base nos resultados da polpação Kraft, a classificação das fibras e as propriedades físico-mecânicas da celulose foram determinadas em amostra de celulose provenientes de cavacos grandes (amostra composta das frações de cavacos um, dois e três), em amostra de celulose de cavacos pequenos (amostra composta das frações de cavacos quatro, cinco e seis) e em amostra de celulose de cavacos controle.

#### 4.8 Classificações das fibras

A Tabela 8 apresenta os resultados de rendimento bruto, rendimento depurado, rejeitos base madeira e número kappa, dos cozimentos realizados com a finalidade de produzir celulose para o teste de classificação morfológica das fibras e para os testes

físicos-mecânicos. Os resultados não foram analisados estatisticamente, mas observa-se que os rendimento bruto, rendimento depurado, rejeitos base celulose e número Kappa do tratamento controle foi numericamente maior que dos tratamentos 1 e 2.

Tabela 8 - Rendimento do cozimento dos cavacos

Tratamentos	Rendimento bruto, %	Rendimento depurado, %	Rejeitos base celulose, %	Número Kappa
Cavacos grandes	50,11	49,96	0,29	22,0
Cavacos pequenos	50,33	50,15	0,36	19,8
Controle	53,86	53,03	1,53	28,7

A Tabela 9 apresenta as percentagens de fibras retidas nas peneiras do classificador *Bauer McNett*, os tratamentos não diferiram estatisticamente entre si nos cinco intervalos de comprimentos e na quantidade que finos. A maior quantidade de fibras ficou retida nas peneiras dois e três, com malha entre 16 a 50 mesh.

Tabela 9 - Comprimento das fibras na celulose dos cavacos

Peneiras	Cavacos grandes	Cavacos pequenos	Controle
> 16 mesh	0,77 <sup>ns</sup>	1,27 <sup>ns</sup>	1,67 <sup>ns</sup>
16 - 30 mesh	50,83 <sup>ns</sup>	52,30 <sup>ns</sup>	53,63 <sup>ns</sup>
30 - 50 mesh	34,20 <sup>ns</sup>	32,00 <sup>ns</sup>	33,17 <sup>ns</sup>
50 - 100 mesh	8,13 <sup>ns</sup>	7,57 <sup>ns</sup>	8,10 <sup>ns</sup>
100 - 200 mesh	3,90 <sup>ns</sup>	3,93 <sup>ns</sup>	4,33 <sup>ns</sup>
< 200 mesh	2,17 <sup>ns</sup>	2,93 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>

ns=tratamentos não diferiram significativamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

#### 4.9 Características físico-mecânicas da celulose

A tabela 10 apresenta os resultados dos testes de resistência da celulose. O grau Schopper Riegler (°SR) apresentou diferença altamente significativa entre os tratamentos, e os três tratamentos diferiram entre si. A celulose produzida com os cavacos pequenos apresentou °SR 50, os cavacos grandes °SR 35 e o tratamento controle °SR 27. Este comportamento revela que a celulose dos tratamentos apresentou diferentes drenabilidade depois do mesmo tempo de refino.

Esta diferença entre os tratamentos pode ser atribuída a variações na espessura da parede celular, as fibras com paredes mais espessas são mais rígidas, e

necessitam de maior tempo de refino para alcançar o mesmo grau de refino, as fibras com paredes mais estreitas são mais fáceis de serem colapsadas. Além da espessura das fibras, o grau de deslignificação da polpa também pode influenciar no refino das fibras, fibras marrons com maior número Kappa apresentam maior percentagem de lignina residual e consequentemente são mais difíceis de serem refinadas.

O peso específico aparente (PEA) não apresentou diferença estatística entre os tratamentos, mas observa-se que a celulose produzida com cavacos pequenos teve o peso específico aparente numericamente maior, esse comportamento revela a tendência dos cavacos pequenos produzirem folhas com as fibras melhor acomodadas e compactas.

A celulose dos cavacos grandes apresentou volume específico aparente (VEA) estatisticamente igual aos cavacos pequenos e aos cavacos do tratamento controle, mas os cavacos controle e os cavacos pequenos diferiram estatisticamente pelo teste de comparação de médias. A celulose produzida com os cavacos controle produziu folhas com maior volume específico, esse comportamento pode ser explicado pelo menor grau de refino das fibras desse tratamento, fibras menos refinadas formaram folhas mais volumosas.

O índice de rasgo não apresentou diferença estatística entre os tratamentos, porém observa-se que a celulose produzida com os cavacos controle foi numericamente maior. O índice de rasgo sofre influência do comprimento das fibras, espessura da parede e das ligações entre fibras. O maior valor apresentado pela celulose dos cavacos controle pode ter influencia da espessura da parede celular e do teor de lignina residual, uma vez que o comprimento das fibras entre os tratamentos foi semelhante e as fibras pouco refinadas.

O índice de arrebatamento (IA) foi maior na polpa dos cavacos controle, menor na polpa dos cavacos grande, a polpa dos cavacos pequenos teve o mesmo comportamento dos demais tratamentos. O IA é influenciado pelo grau de refino da celulose, este índice tende aumentar com o aumento do grau de refino, mas as polpas muito refinadas perdem a resistência ao arrebatamento. O tratamento que apresentou o maior IA apresentou fibras com o menor grau de refino, portanto pode ter ocorrido interações entre fibras morfológicamente diferentes que contribuíram para melhorar as ligações entre fibras dos cavacos do tratamento controle.

A resistência ao ar (RA) foi maior na polpa dos cavacos pequenos e menor na polpa dos cavacos controle. A resistência ao ar é afetada pela pelo comprimento e espessura das fibras, em geral, fibras mais curtas e com paredes mais estreitas aumentam a resistência ao ar do papel, bem como a maior presença de finos, os quais preenchem os espaços entre as fibras diminuindo a porosidade superficial. A maior resistência observada na polpa produzida com os cavacos pequenos foi influenciada pelo maior refinamento das fibras, que possibilita maior área de ligação entre fibras e conseqüentemente redução dos poros.

O índice de tração (IT), alongamento (A) e índice de energia absorvida na tração (ITEA) não tiveram diferença significativa entre os tratamentos, mas apresentaram a mesma tendência numérica. A celulose marrom produzida com os cavacos pequenos apresentou os maiores valores e a polpa dos cavacos grandes os menores valores nas três determinações. O índice de rigidez a tração também não foi influenciado pela o tamanho dos cavacos, porém observa-se que a polpa produzida com os cavacos grandes apresentou maior valor e a polpa produzida com os cavacos pequenos o menor valor médio.

Tabela 10 - Propriedades da polpa marrom refinada em moinho jokro a 7000 revoluções

Propriedades	Cavacos grandes		Cavacos pequenos		Controle	
Grau Schopper Riegler	34,50	B	49,50	A	26,50	C
Peso específico aparente, g/cm <sup>3</sup>	0,39		0,43		0,37	
Volume específico aparente, cm <sup>3</sup> /g	2,56	AB	2,32	B	2,70	A
Índice de rasgo, mN.m <sup>2</sup> /g	4,38		4,46		7,36	
Índice de arrebentamento, kPa.m <sup>2</sup> /g	1,84	B	2,04	AB	2,38	A
Resistência ao ar, s/100mL	3,20	AB	8,48	A	1,65	B
Índice de tração, N.m/g	30,59		35,61		33,94	
Alongamento, %	2,00		2,72		2,67	
Ind. de energia absorvida na tração, kJ/kg	0,42		0,66		0,60	
Índice de rigidez à tração, kN.m/kg	336,70		268,92		312,34	

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferiram estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey de comparação de médias.

## 5 CONCLUSÕES

Os cavacos classificados industrialmente apresentaram frações com dimensões e volumes diferentes;

Os cavacos menores apresentaram baixa densidade básica e densidade a granel, e alto consumo específico de madeira para produção de uma tonelada de celulose depurada e alto teor de holocelulose;

A redução das dimensões dos cavacos melhorou a deslignificação, e não reduziu os rendimentos bruto e depurado de celulose;

Os cavacos do tratamento controle apresentaram características físicas e químicas, rendimento da deslignificação e características físico-mecânicas da polpa adequadas para a produção de celulose;

A polpa produzida com os cavacos pequenos atingiu maior grau de refino que as polpas produzidas com cavacos grandes e cavacos controle. A celulose produzida com a polpa dos cavacos pequenos apresentou maior resistência ao ar e menor volume específico;

A fração dos cavacos com nós foi a mais prejudicial para o processo de polpação dos cavacos, devido às características físicas e químicas desfavoráveis dessa madeira, quanto maior a percentagem de madeira com nó maior a dificuldade para processo de cozimento, conseqüentemente menor deslignificação e maior o teor de rejeitos.

A divisão dos cavacos classificados industrialmente em dois grupos pode agrupar cavacos com características físicas e químicas mais homogêneas. Os resultados dos cozimentos mostram que os cavacos pequenos foram mais deslignificados que os cavacos grandes e cavacos controle, nas mesmas condições de cozimento, ou seja, os cavacos pequenos podem ser cozidos em condições menos drásticas e gerar uma economia no consumo e na recuperação dos reagentes químicos utilizados no processo de cozimento Kraft.

Os cavacos pequenos produziram polpa menos resistente ao refino, a separação dos cavacos grandes e pequenos também poderia evitar que as fibras dos cavacos pequenos fossem refinadas demasiadamente. As variações encontradas nos testes de resistência da celulose podem indicar aptidões diferentes para as polpas produzidas a partir de

cavacos com dimensões diferentes, ou seja, a polpa de cavacos grandes poderia ser utilizada para fabricação de papeis sanitários, por que produz celulose com maior volume específico, enquanto a polpa dos cavacos pequenos poderia ser destinada para fabricação de papeis para impressão, devido a maior facilidade de refino e compactação das fibras.

O comportamento diferente dos cavacos grandes e pequenos quanto à deslignificação e características físico-mecânicas da celulose não é explicado apenas pela diferença no tamanho dos cavacos. As dimensões corretas dos cavacos são fatores importantes para o processo de transformação da madeira em celulose, mas as diferenças físicas da madeira interferem efetivamente no desempenho do processo de produção e na polpa de celulose produzida.

## 6 REFERÊNCIAS

- ANDRADE, E. N. **O eucalipto**. 2. ed. Jundiaí: Cia. Paulista de Estradas de Ferro, 1961.
- ANDRADE, M. C. S. **Variação das características das fibras em função da densidade básica de cavacos de madeira de *Eucalyptus grandis* HILL EX MAIDEIN**. 1987. 43 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Licenciatura em Ciências Biológicas)-Instituto Básico de Biologia Médica e Agrícola, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Curso de especialização em celulose**: processamento da madeira. Telêmaco Borba: ABTCP/UFV, 1999. 75 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **Dados do setor**. 2012. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/booklet.pdf>>. Acesso em: 27 mar. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Relatório anual**. São Paulo, 2010.
- ASSUMPCÃO, R. M. V. et al. Polpação química. In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Celulose e papel**. São Paulo: Escola SENAI “Theobaldo de Nigris”, 1988. v. 1, p. 169- 312.
- BAEZA, J.; FREER, J. Chemical characterization of wood and its components. In: HON, D. N. S.; SHIRAIISHI, N. (Ed.). **Wood and cellulosic chemistry**. 2nd. ed. New York: Marcel Dekker, 2001. p. 275-384.
- BENEFIEL, R. Wood preparation. In: CULLINAN, H. **The pulp and paper technology advanced workforce training and education series**. Norcross: TAPPI PRESS, 2006. v. 4, p. 19-30.
- BRISOLA, S. H.; DEMARCO, D. Análise anatômica do caule de *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla* e *E. grandis xurophylla*: desenvolvimento da madeira e sua importância para a indústria. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 91, p. 317-330, set. 2011.
- BRODERICK, G.; CACCHIONE, E.; HÉROUX, Y. The importance of distribution statistics in the characterization of chip quality. **TAPPI Journal**, Newton, v. 81, n. 2, p. 131-142, Feb. 1998.
- BURGUER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.
- BUSNARDO, C. A. **Refinação de polpa de eucalipto e suas aplicações em diferentes tipos de papéis**. Guaíba: Riocell, 1990. 25 p. (Relatório Técnico, 368).

BUTTERFIELD, B. The structure of wood: form and function. In: WALKER, J. C. F. **Primary wood processing**. 2nd. ed. Dordrecht: Springer, 2006. p. 01-20.

CARPIM, M. A.; SOUZA, V. R.; BARRICHELO, L. E. G. Comparação das características da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* de diferentes procedências. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL, 18., 1985, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1985. p. 57-68.

COSTA, J. A. **Qualidade da madeira de *Eucalyptus urograndis*, plantado no Distrito Federal, para produção de celulose Kraft**. 2011. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2011.

COSTA, V. E. **Caracterização físico-energética da madeira e produtividade de reflorestamentos de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla***. 2006. 114 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

COUTO, L. C. **Influência da morfologia dos cavacos de madeira de *Eucalyptus urophylla* de origem híbrida na qualidade da celulose Kraft**. 1979. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1979.

CRAWFORD, R. L. **Lignin biodegradation and transformation**. New York: John Wiley, 1981. 154 p.

D'ALMEIDA, M. L. O. Composição química dos materiais lignocelulósicos. In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Celulose e papel**. São Paulo: Escola SENAI "Theobaldo DE Nigris", 1988. v. 1, p. 45- 105.

DAHL, C. F. United States patent office. In: GRACE, T. M.; MALCOLM, E.W. **Pulp and paper manufacture**. 3rd. ed. Montreal: Canadian Pulp and Paper Association, 1989. p. 6-14.

DIAS, V. R. L.; SILVA, C. A influência da densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* em suas características químicas e propriedades de polpação e do papel. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL, 18., 1985, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1985. p. 31-56.

DOUGHTY, R. W. **The eucalyptus: a natural and commercial history of the gum tree**. Baltimore: Johns Hopkins, 2000. 237 p.

DOWNES, G. M. et al. **Sampling plantation eucalypts: for wood and fibre properties**. Collingwood: CSIRO, 1997. 132 p.

FOELKEL, C. E. B. **Individualização das fibras da madeira do eucalipto para produção de celulose Kraft**. Grau Celsius, 2009. Disponível em: <[http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/P16\\_IndividualizacaoFibras.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/P16_IndividualizacaoFibras.pdf)>. Acesso em: 17 abr. 2010a.

FOELKEL, C. E. B. **O processo de impregnação dos cavacos de madeira de eucalipto pelo licor Kraft de cozimento**. Grau Celsius, 2009. Disponível em: <[http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT15\\_ImpregnaçãoCavacos.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT15_ImpregnaçãoCavacos.pdf)>. Acesso em: 28 abr. 2010b.

FOELKEL, C. E. B. **As fibras dos eucaliptos e as qualidades requeridas na celulose Kraft para a fabricação de papel**. Grau Celsius, 2009 Disponível em: <[http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos /PT03\\_fibras.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos /PT03_fibras.pdf)>. Acesso em: 17 abr. 2010c.

FOELKEL, C. E. B. **Propriedades papelarias das árvores, madeira e fibras celulósicas dos eucaliptos**. Grau Celsius, 2009. Disponível em: <[http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos /PT14\\_PropriedadesPapeleiras.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos /PT14_PropriedadesPapeleiras.pdf)>. Acesso em: 17 abr. 2010d.

FOELKEL, C. E. B. **Elementos de vaso e celuloses de eucalipto**. Grau Celsius, 2009. Disponível em: <[http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos /PT04\\_vasos.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos /PT04_vasos.pdf)>. Acesso em: 17 abr. 2010e.

FULLER, W. S. Chipping, screening and cleaning. In: KOCUREK, M. J.; STEVENS, C. F. B. (Ed.). **Pulp and paper manufacture**. 3rd. ed. Montreal: Canadian Pulp and Paper Association, 1983. p. 128-144.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 108 p.

GOMES, I. M. B. A. **Segmento brasileiro de polpa: evolução, competitividade e inovação**. 2011. 156 f. Tese (Doutorado em Economia Aplicada)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2011.

GOLVÊA, A. F. G. et al. Avaliação da madeira e da polpação Kraft em clones de Eucaliptos. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 33, n. 6, p. 1175-1185, set. 2009.

GRACE, T. M. et al. (Ed.). Process variables. In: \_\_\_\_\_. **Alkaline pulping**. 3rd. ed. Montreal: Canadian Pulp and Paper Association, 1989a. chap. 5, p. 74-113.

GRACE, T. M. et al. (Ed.). Chemical reactions of wood constituents. In: \_\_\_\_\_. **Alkaline pulping**. 3rd. ed. Montreal: Canadian Pulp and Paper Association, 1989b. chap. 5, p. 23-44.

GULLICHSEN, J.; PAULAPURO, H. (Ed.). **Chemical pulping**. Helsinki: Fapet Oy, 2000, v. 6A, 693 p.

HARTLER, N. Achievement and significance of optimal chip quality. **TAPPI Journal**, Newton, v. 79, n. 2, p. 259-264, Feb. 1996.

HOADLEY, R. B. **Undertanding wood a craftsman’s guide to wood technology**. Newtown: Taunton Press, 2000. 280 p.

- INALBON, M. C. et al. Impregnação de madeiras de eucalipto e pinho em processo de polpação alcalina, efeitos da pré-vaporização e da impregnação pressurizada. **O Papel**, São Paulo, v. 66, n. 4, p. 77-82, abr. 2005.
- INGRUBER, O. V.; KOCUREK, M. J.; WONG, A. (Ed.). **Pulp and paper manufacture** 3rd. ed. Montreal: Canadian Pulp and Association, 1985. v. 4, 352 p.
- KRAUS, J. E. et al. A célula vegetal. In: APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. (Ed.). **Anatomia vegetal**. 2. ed. Viçosa, MG: Ed. da UFV, 2006. p. 31-86.
- JUVENAL, T. L.; MATTOS, R. L. G. **Histórias setoriais: o setor de celulose e papel**. 2002. Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndespt/Institucional/Publicacoes/Consulta\\_Expressa/Setor/Produtos\\_Florestais/](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndespt/Institucional/Publicacoes/Consulta_Expressa/Setor/Produtos_Florestais/)>. Acesso em: 29 mar. 2012.
- MACHADO, F. J. J. et al. Caracterização da madeira de *Eucalyptus pilularis* e estudos para produção de celulose Kraft. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 12, n. 2, p. 111-122, 1988.
- MARRISON, R.; BOYD, R. Hidratos de carbono II dissacarídeos e polissacarídeos. In: \_\_\_\_\_. **Química orgânica**. 13. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1996. cap. 35, p. 1327-1348.
- MARTINI, A. J. **O plantador de eucaliptos: a questão da preservação florestal no Brasil e o resgate documental do legado de Edmundo Navarro de Andrade**. 2004. 332 f. Dissertação (Mestrado em História Social)-Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- MILANEZ, A. F. et al. Influência das hemiceluloses nas propriedades óticas e físico-mecânicas da polpa. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 15., 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Celulose e Papel, 1982. p. 155-170.
- MIMMS, A. et al. (Ed.) **Kraft pulping: a compilation of notes**. Atlanta: Tappi Press, 1993. 181 p.
- MONTEBELLO, A. E. S. **Análise da evolução da indústria de celulose no período de 1980 a 2005**. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- OLIVEIRA, J. T. S. et al. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 115-127, 2005.
- PARHAM, R. A. Wood defects. In: KOCUREK, M. J.; STEVENS, C. F. B. (Ed.). **Pulp and paper manufacture**. 3rd. ed. Montreal: Canadian Pulp and Paper Association, 1983. p. 66-79.
- PENFOLD, A. R.; WILLIS, J. L. **The eucalypts**. London: Leonard Hill, 1961. 551 p.

QUEIROZ, S. C. S. **Efeito das características anatômicas e químicas na densidade da madeira e na qualidade da polpa de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla***. 2002. 91 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2002.

ROCHA, F. T.; FLORSHEIM, S. M. B.; COUTO, H. T. Z. Variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* HILL ex. MAIDEN aos sete anos. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 43-55, jun., 2004.

ROWELL, R. M. et al. Cell wall chemistry In: Rowell R. M. (Ed.). **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005. chap. 3, p. 35-76.

SANTANA, W. M. S. et al. Efeito da idade e da classe diamétrica nas propriedades da madeira de *Eucalyptus* clonal. **Revista Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 1-8, jan./mar. 2012.

SANTOS, A. et al. Effects of *Eucalyptus globulus* wood density on papermaking potencial. **TAPPI Journal**, Newton, p. 25-32, May, 2008.

SCANDINAVIAN PULP, PAPER AND BOARD TESTING COMMITTEE. **SCANC19:65**: Drainability of pulp by the Schopper-Riegler method. Stockholm: Scandinavian, 1964. 4 p.

SILVA, J. C. et al. Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* HII EX. MAIDEN. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 36, p. 455-460, maio-jun. 2005.

SJOSTROM, E. **Wood chemistry: fundamentals and applications**. 2nd. ed. San Diego: Academy Press, 1993. 293 p.

SMOOK, G. A. Characteristics of wood and wood pulp fibers. In: SMOOK, G. A. **Handbook for pulp & paper technologists**. 3rd. ed. Vancouver: Angus Wilde Publications, 2002. p. 10-19.

SOUZA, M. C. H. et al. Variação da densidade á granel de cavacos de *Eucalyptus saligna* em função das suas dimensões e da umidade. In: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 35., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 2002.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T211 om-93**: ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C. Atlanta: Tappi Press, 1993. 4 p.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T212 om-98**: one percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp. Atlanta: Tappi Press, 1998. 4 p.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T220 sp-96**: physical testing of pulp handsheets. Atlanta: Tappi Press, 1996. 6 p.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T222 om-98**: acid-insoluble lignin in wood and pulp. Atlanta: Tappi Press, 1998. 5 p.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T258 om-94**: basic density and moisture content of pulpwood. Atlanta: Tappi Press, 1993. 8 p.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T264 cm-97**: preparation of wood for chemical analysis. Atlanta: Tappi Press, 1997. 3 p.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T236 cm-85**: kappa number of pulp. Atlanta: Tappi Press, 1997. 3 p.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T494 om-96**: tensile properties of paper and paperboard (using constant rate of elongation apparatus). Atlanta: Tappi Press, 1996. 10 p.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T402 om-93**: standard conditioning and testing atmospheres for paper, board, pulp handsheets, and related products. Atlanta: Tappi Press, 1993. 4 p.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T403 om-97**: bursting strength of paper. Atlanta: Tappi Press, 1997. 6 p.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T460 om-96**: air resistance of paper (Gurley method). Atlanta: Tappi Press, 1996. 6 p.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T414 om-98**: Internal tearing resistance of paper (Elmendorf-type method). Atlanta: Tappi Press, 1998. 7 p.

TESSIER, P. Chip size distribution for an ultra-high-yield sulfite process. **TAPPI Journal, Newton**, v. 82, n. 12, p. 01-08, Apr. 2000.

TWADDLE, A. The influence of species, chip length, and ring orientation on chip thickness. **TAPPI Journal, Newton**, v. 80, n. 6, p. 123-131, Jun. 1997.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade básica**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 1984. 21 p.

WALKER, J. C. F. Basic wood chemistry and cell wall ultrastructure. In: \_\_\_\_\_. **Primary wood processing**. 2nd. ed. Dordrecht: Springer, 2006. p. 23-59.

WALKER, J. C. F. Pulp and paper manufacture. In: \_\_\_\_\_. **Primary wood processing**. 2nd. ed. Dordrecht: Springer, 2006. p. 477-532.