

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

**Produtividade, idade e qualidade da madeira de *Eucalyptus*  
destinada à produção de polpa celulósica branqueada**

**Marileide Gomes da Silva**

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

**Piracicaba  
2011**

**Marileide Gomes da Silva  
Engenheiro Florestal**

**Produtividade, idade e qualidade da madeira de *Eucalyptus* destinada à produção de polpa celulósica branqueada**

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

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

**Piracicaba  
2011**

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

Silva, Marileide Gomes da  
Produtividade, idade e qualidade da madeira de *Eucalyptus* destinada à produção de  
polpa celulósica branqueada / Marileide Gomes da Silva. - - Piracicaba, 2011.  
95 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.  
Bibliografia.

1. Branqueamento 2. Celulose sulfato 3. Densidade da madeira 4. Eucalipto 5. Madeira  
Polpa de Madeira 7. Solos I. Título

CDD 674.142  
S586p

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

Aos meus pais, Balbino e Onete  
por todo amor, suporte e encorajamento.



## AGRADECIMENTOS

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e ao Departamento de Ciências Florestais por me ensinarem com competência desde a graduação;

Ao Prof. Francides Gomes da Silva Júnior pela orientação, as várias oportunidades de crescimento e confiança depositada;

A minha família pelo amor, apoio e confiança;

Ao Laboratório de Química, Celulose e Energia “Prof. Luiz Ernesto George Barrichelo” –LQCE/LEGB e ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais- IPEF por todo apoio que me foi dado;

Aos professores Luiz Ernesto George Barrichelo e José Luiz Stape pelo apoio, ensinamentos e conselhos;

A todos os lqceanos pelos ótimos momentos de convivência durante esse período, em especial a Regina Buch, Zé Martins, Lívia Palmeiras, Miguel Vera, Tiago Segura, Camila Sarto e Raphael Moral;

Aos Prof. Tomazello, Maria, Carlos, Moises e Mateus, pelo apoio e amizade;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela bolsa concedida;

A Jari Celulose S.A por financiar parte desta pesquisa;

A Fibria, Unidade Três Lagoas, pela oportunidade de aprendizado e estrutura fornecida para realização de parte desta pesquisa;

Aos colegas da sala da pós-graduação Lauro, Eduardo, Angêla, Felipe, Vinicius e em especial ao Alexandre Ferraz pela ajuda e amizade;

A Aline, Janaina, Jussálvia e Cornélio pela amizade e convivência durante esses últimos anos;

Ao Renato Meulman pela ajuda e companheirismo;

A todos os funcionários do LCF e IPEF por todo apoio que me foi dado durante toda a graduação e mestrado;

A todos que contribuíram com a realização deste trabalho.

Desejo que você plante uma semente, por mais minúscula que seja,  
E acompanhe o seu crescimento, para que você saiba de quantas  
Muitas vidas é feita uma árvore...

Desejo depois que você seja útil, mas não insubstituível.  
E que nos maus momentos, quando não restar mais nada,  
Essa utilidade seja suficiente para manter você de pé.

Desejo ainda que você seja tolerante, não com os que erram pouco,  
Porque isso é fácil, mas com os que erram muito e irremediavelmente,  
E que fazendo bom uso dessa tolerância, você sirva de exemplo aos outros.

Victor Hugo



## SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT.....	13
1 INTRODUÇÃO .....	15
2 DESENVOLVIMENTO .....	17
2.1 Revisão Bibliográfica.....	17
2.2 Material e Métodos.....	27
2.2.1 Descrição da área .....	27
2.2.2 Amostragem .....	29
2.2.3 Métodos .....	31
2.2.3.1 Densidade básica e Índice de Heterogeneidade .....	31
2.2.3.2 Composição química da madeira .....	32
2.2.3.3 Dimensão das fibras .....	32
2.2.3.4 Classificação granulométrica.....	33
2.2.3.5 Dimensões dos cavacos .....	33
2.2.3.6 Polpação.....	34
2.2.3.7 Parâmetros determinados .....	34
2.2.3.8 Branqueamento.....	36
2.2.3.9 Refino e testes físicos.....	38
2.2.3.10 Delineamento experimental e análise estatística .....	39
2.3 Resultados e Discussão .....	39
2.3.1 Densidade básica da madeira e Índice de Heterogeneidade .....	39
2.3.2 Composição química da madeira .....	43
2.3.3 Dimensões das fibras .....	45
2.3.4 Dimensões dos cavacos .....	47
2.3.5 Polpação.....	50
2.3.6 Licor negro.....	60
2.3.7 Branqueamento.....	61
2.3.8 Propriedades físico-mêcanicas das polpas celulósica branqueadas.....	65
3 CONCLUSÕES .....	73
REFERÊNCIAS .....	75

ANEXOS.....81

## RESUMO

### **Produtividade, idade e qualidade da madeira de *Eucalyptus* destinada à produção de polpa celulósica branqueada**

Este trabalho teve como objetivo verificar a influência da produtividade e da idade sobre a qualidade da madeira proveniente de clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* para produção de polpa celulósica branqueada. Utilizou-se madeira de um único clone proveniente de áreas com elevada produtividade, média de  $33 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , onde os solos eram argilosos e de áreas com baixa produtividade, média de  $17 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , sendo estes solos arenosos. Nos dois tipos de solos foram avaliadas árvores com idades de 4, 5, 6 e 7 anos, proveniente de povoamentos florestais do estado do Pará - Brasil. Para cada amostra foram utilizadas 10 árvores com diâmetros médio do povoamento. Os materiais foram avaliados com relação a densidade básica, composição química e desempenho frente ao processo kraft de polpação. Os cozimentos foram realizados a  $166^\circ\text{C}$  com 60 min de aquecimento, 85 min de cozimento e carga de álcali variável de acordo com a necessidade de cada material para obtenção de kappa  $18 \pm 0,5$ . Os resultados obtidos mostraram que a densidade básica da madeira aumentou em função da idade, variando de 0,510 a  $604 \text{ g cm}^{-3}$  com 4 e 7 anos, respectivamente; essa maior densidade em idades mais elevadas é explicada pela maior proporção de madeira adulta, em relação a madeira juvenil. A quantidade de extrativos totais também aumentou em função da idade variando de 4,9 a 5,7% com 4 e 7 anos, respectivamente. A quantidade de lignina não apresentou diferença significativa e variou entre 29,26 e 29,72%. As amostras provenientes de solos argilosos apresentaram maior rendimento depurado (50 a 52%), e requereram menor carga de álcali (21 a 24,5% de álcali ativo) para o mesmo nível de deslignificação (kappa  $18 \pm 0,5$ ); para as amostras de solos arenosos a carga de álcali foi de 21,5 a 25% e rendimento de 48 a 51%. As polpas celulósicas oriundas de matérias de solos argilosos apresentaram menor quantidade de ácidos hexenurônicos e maior viscosidade, além de apresentarem melhores propriedades físico-mecânicas, como volume específico, resistência ao ar, índices de tração, rasgo e estouro. As madeiras provenientes de área com elevada produtividade apresentaram melhor qualidade para produção de polpa celulósica em relação a área de baixa produtividade.

Palavras-chave: Solo; Densidade básica; Processo kraft; Testes físico-mecânicos



## ABSTRACT

### **Productivity, age and wood quality of *Eucalyptus* for bleached pulp production**

This study aimed to determine the influence of productivity and age on wood quality from hybrid clones of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* for bleached pulp production. The material considered were collected in areas with high productivity, an average of 33 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, clay soils and low-productive areas, an average of 17 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, sandy soils. In both types of soils, we evaluated trees aged 4, 5, 6 and 7 years, from forest stands from the state of Pará – Brazil. For each sample were used 10 average trees (diameter). Materials were evaluated for chemical composition, basic density and performance in relation to the kraft pulping process. The cooking was performed at 166°C with 60 min heating, 85 min cooking and alkali charge varying according to the needs of each material to obtain kappa number of 18±0.5. Results showed that the basic density of wood increases with age, ranging from 0.510 to 604 g cm<sup>-3</sup> with 4 and 7 years, respectively. This increased density in older ages is possibly explained by the higher proportion of mature wood, in relation to juvenile wood. The total amount of extractives also increased with age varying from 4.9 to 5.7% with 4 and 7 years, respectively. The amount of lignin was not significantly different ranging from 29.26 to 29.72%. Samples from clay soils had a higher yield of pulp (50 to 52%), and required lower alkali charge (21 to 24.5% active alkali) to the same level of delignification (kappa number 18±0.5); for samples from sandy soil alkali charge was 21.5 to 25% and yield of 48 to 51%. Pulp from material derived from clay soils had less hexenuronic acid and higher viscosity, which is justified by the lower alkali applied. In addition, also presented better physical and mechanical properties such as specific volume, air resistance, tensile, tear and burst index. Wood from an area of high productivity showed better quality for pulp production over an area of low productivity, for consuming a smaller amount of chemical charge to the same kappa number, higher pulp yield, pulp with higher viscosity and better physical and mechanical properties.

Keywords: Soil; Basic density; Kraft pulping process; Physical-mechanical trials



## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa a quarta posição entre os produtores mundiais de polpa celulósica. Segundo dados da Associação Brasileira de Celulose e Papel - BRACELPA a produção brasileira de polpa celulósica em 2009 foi de 13,3 milhões de toneladas. Estima-se que a produção de polpa celulósica brasileira deverá ultrapassar os 14 milhões de toneladas até 2012.

Esta produção está baseada na utilização de madeira proveniente de florestas plantadas principalmente do gênero *Eucalyptus*, que representa 81,6% da produção total.

O *Eucalyptus* se destaca no setor florestal brasileiro devido aos avanços tecnológicos na área de silvicultura e favoráveis condições edafoclimáticas. Atualmente, a produtividade média das florestas plantadas com eucalipto no Brasil está entre as mais altas do mundo, com média nacional de  $45 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  e curtos ciclos de corte, entre 5 e 7 anos, o que proporciona baixos custos de produção.

Apesar da elevada taxa de crescimento do *Eucalyptus*, o setor ainda busca ganhos no processo de produção, através de melhorias na qualidade da madeira, que traz como benefícios menores custos de produção, aumento de rendimento e melhor qualidade do produto final.

A variabilidade da madeira do *Eucalyptus* dentre e entre espécies é um dos fatores que causa grandes impactos no processo de fabricação de polpa celulósica. Dentre os fatores que podem influenciar a qualidade da madeira pode se destacar os atributos do solo e a idade da árvore na época de corte.

A fertilidade e as características físicas do solo podem influenciar a qualidade da madeira, sobretudo, por interferirem na taxa de crescimento da árvore. Solos que apresentam textura argilosa retêm mais água, fator limitante no crescimento das árvores. Por sua vez, florestas com maior taxa de crescimento geralmente dão origem a madeiras com menores quantidades de lignina e extrativos, parâmetros indesejáveis na produção de polpa celulósica.

Além disso, os solos argilosos quando comparados aos de textura arenosa possuem menores deficiências nutricionais, o que pode aumentar tanto a biomassa

foliar quanto a eficiência fotossintética, proporcionando maior produção de carboidratos e conseqüentemente, maior produtividade da floresta.

Outro fator que influencia a qualidade da madeira é idade da árvore; as características da madeira de um determinado material genético se alteram com a idade da árvore em função de alterações fisiológicas. Em paralelo a idade de corte é um importante componente do manejo florestal e representa um parâmetro importante no planejamento florestal e na composição do custo da madeira.

Com base nos aspectos mencionados, torna-se muito importante o conhecimento das características da madeira de *Eucalyptus* que causam impacto no processo de produção e suas correlações com os parâmetros silviculturais. Assim, pode-se fazer uma correta interpretação dessas variações que ocorrem na madeira, visando facilitar e aprimorar o processo de fabricação de polpa celulósica de forma a obter produtos com as características desejáveis.

Dentro deste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência da produtividade e da idade sobre a qualidade da madeira proveniente de clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* em áreas de elevada e baixa produtividade, com idades de 4, 5, 6 e 7 anos, para produção de polpa celulósica branqueada.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Revisão Bibliográfica

Esta revisão aborda os aspectos relacionados à produtividade florestal, qualidade da madeira e aspectos básicos de processos químicos de produção de polpa celulósica.

A produtividade de uma floresta pode ser entendida como sendo a resposta das árvores em função do clima, relevo, espécie, solo, idade e manejo (GESSEL, 1982). Essa resposta pode ser medida de diversas formas, dentre elas o volume de madeira no tronco, a biomassa arbórea, a produção de frutos, folhas ou resinas.

O termo produtividade florestal é bastante abrangente, pois é o reflexo de todas as ações técnicas e operacionais aplicadas a um determinado plantio. O fator tempo está intimamente relacionado à produtividade, principalmente quando analisada do ponto de vista econômico e financeiro, razão maior dos plantios efetuados com as espécies dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* (MORA; BALLONI, 1988).

Uma denominação bastante usual para produtividade florestal é a taxa de crescimento dos povoamentos florestais, que pode ser medida através do Incremento Médio Anual (IMA). Essa medida geralmente é realizada através da divisão do volume de madeira em uma área pela idade da floresta, de acordo com a equação seguinte:

$$IMA = \frac{V}{t}$$

Onde:

IMA= Incremento Médio Anual ( $m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ )

V= Volume de madeira produzido ( $m^3$ )

t = Idade da floresta (anos)

Do ponto de vista volumétrico, estabeleceu-se que a idade de corte ótima de uma floresta é aquela que resulta no maior Incremento Médio Anual ao longo de diversas rotações. Essa decisão se justifica por resultar em um volume anual médio maior do

que o volume anual que seria obtido se a floresta fosse cortada em qualquer outra idade (COUTO et al., 1989).

Por outro lado, Rodrigues et al. (1997), alerta que a idade de corte de um talhão representa uma das principais variáveis de decisão em planos de manejo florestal. A definição da duração de uma rotação pode requerer uma análise independente por talhão ou estar vinculada à produção simultânea de todos os talhões da floresta. Entretanto, as técnicas de análise parcial por talhões têm sido usadas indiscriminadamente e a generalização dos resultados criam certos hábitos indesejáveis, entre eles, inclui-se a recomendação por uma idade única de corte para eucalipto, 7 anos, desconsiderando a rotação, o tipo de crescimento da espécie, a vinculação com planos globais de abastecimento e o aumento em valor devido ganhos em qualidade da madeira.

A idade de corte também é utilizada como parâmetro para a comparação de produtividade, na década de 70 o IMA (7 anos) médio dos plantios de eucalipto no Brasil era de 10 a 20 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e atualmente está entre 35 e 45 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, o que resulta na ocupação de menores áreas para mesma produtividade e possivelmente menor idade de corte.

No entanto, existem vários fatores que podem limitar a produtividade de uma floresta e pensando nos fatores que afetam o crescimento de uma planta (água, luz e nutrientes) Binkley et al. (2004) e Stape et al. (2004), baseados em Monteith (1977), utilizaram a equação ecológica de produção para descrever o crescimento de uma floresta em função da disponibilidade, captura e uso dos recursos naturais.

Equação ecológica:

$$P = S + ECR + EUR$$

Onde:

P = Produção;

S = Suprimento;

ECR = Eficiência de captura dos recursos;

EUR= Eficiência de uso dos recursos.

De acordo com a equação ecológica, a produtividade florestal pode ser limitada pelo suprimento de um ou mais recursos, ou seja, água, luz ou nutrientes, e dentre esses recursos a água é o fator mais limitante para as plantações de eucalipto, no entanto também há diversas ocorrências de limitação nutricional à produtividade de florestas de eucalipto. Sendo assim, o manejo silvicultural da floresta torna-se um aspecto chave para garantir o suprimento adequado de recursos e a produtividade de florestas comerciais (BILNKLEY et al., 2004; STAPE et al., 2004; 2006).

Foelkel (2009), também relata que a maior ou menor produtividade dos povoamentos de eucaliptos, principalmente quando plantados em solos de baixa fertilidade, está associada ao grau de eficiência da utilização dos nutrientes. Cada espécie ou clone tem sua capacidade de produzir matéria seca a partir dos nutrientes que absorve e utiliza no metabolismo. Evidentemente, se apenas um, ou mais de um nutriente estiver em nível limitante à floresta não irá crescer.

Portanto, plantios florestais sob uma maior disponibilidade de recursos deverão ser mais produtivos, devido ao aumento da taxa de crescimento das árvores, causado pela maior disponibilidade de água e nutrientes.

Considerando que a taxa de crescimento da planta pode influenciar nas características da madeira, espera-se que exista uma correlação entre os fatores que afetam o ritmo de desenvolvimento da árvore e a qualidade da madeira.

Rigato et al. (2004), estudaram a qualidade da madeira de *Pinus taeda* em vários sítios e verificaram que a madeira proveniente de sítios com ritmo de crescimento elevado, sítios com textura mais argilosa, mostrou ter menores valores de densidade básica.

Brasil e Ferreira (1971), Ferreira et al. (1978) e Migliorini (1986), também encontraram boa correlação entre produtividade e densidade básica. Ao analisar a mesma espécie plantada em diferentes locais, verificou-se que em regiões mais férteis que promoveram maior taxa de crescimento das árvores, a densidade básica da madeira foi menor.

Segundo Foelkel (2009), a tendência normal é a ligeira queda da densidade básica para povoamentos que crescem mais e tenham maior produtividade volumétrica.

Mas isso não é uma realidade absoluta, pois há muitos clones produtivos e com mais altas densidades básicas.

Shimoyama e Barrichelo (1989), avaliando o efeito da fertilização na qualidade da madeira, também destacaram a densidade básica como uma das principais características da madeira que são afetadas por alterações no ritmo de crescimento das árvores. Além da densidade, os autores também citaram as características morfológicas das fibras, a composição química e as quantidades de madeira juvenil e adulta. O comprimento das fibras é afetado pela taxa de crescimento, pois está diretamente relacionado com a frequência de divisões transversais no câmbio (NICHOLS, 1971).

Gava et al. (2005), estudaram as relações entre os atributos do solo, produtividade e a qualidade da madeira, observaram que os atributos do solo, sobretudo o teor de argila, diretamente relacionado à quantidade de água disponível, foram os que mais afetaram a produtividade e qualidade da madeira. O teor de lignina total diminuiu e o de holocelulose aumentou exponencialmente com o aumento do teor de argila do solo.

No entanto, ainda são poucos os estudos que correlacionam diretamente a produtividade da floresta e seus fatores de interferência sobre a qualidade da madeira.

Para produção de polpa celulósica, a qualidade da madeira é altamente dependente dos aspectos físicos, químicos e anatômicos da matéria prima, e também, das características tecnológicas da transformação da madeira em polpa celulósica (BARRICHELLO, 1983; GOMIDE et al., 2005).

Dentre os parâmetros físicos a densidade básica é a mais utilizada na avaliação da qualidade da madeira destinada à produção de polpa celulósica, pois é uma propriedade complexa, resultante da combinação de diversos fatores, e que influencia nas variáveis do processo de polpação e nas características da polpa celulósica.

Foelkel et al. (1992), descreve que apesar da densidade básica ter se constituído como um índice universal para avaliar a qualidade da madeira, esta medida não deve ser considerada absoluta. Isso porque a densidade básica é um fator resultante, é a consequência e não a causa da distribuição, tipos e composição dos elementos anatômicos que compõem a madeira.

Segundo Gomes et al. (1998), a densidade básica ideal para produção de polpa celulósica se encontra no equilíbrio entre capacidade produtiva da caldeira e do digestor e, para empresas em fase de projeto, dependerá da tecnologia dos equipamentos e da qualidade das florestas a serem utilizadas.

Na tabela 1 são apresentadas algumas vantagens de se utilizar madeiras de densidades baixas e altas para produção de polpa celulósica conforme relatado por Gomes (1998):

Tabela 1 - Comparação de altas e baixas densidades para produção de polpa celulósica

Baixa densidade básica (0,400 a 0,480 g cm <sup>-3</sup> )	Alta densidade básica (0,480 – 0,560 g cm <sup>-3</sup> )
Menor custo de exploração	Menor custo com transporte
Menor teor de casca	Maior capacidade de armazenamento no pátio
Menor consumo de facas no picador	Menor consumo específico de madeira
Menor consumo de álcali	Maior espessura de parede
Maior rendimento	Maior índice de rasgo
Maior facilidade de impregnação	Maior volume específico
Menor energia de refino	Maior porosidade do papel

A variação de densidade básica da madeira causa alterações no processo de polpação, por isso é recomendável um planejamento adequado do abastecimento de madeira na fábrica. Dentre as alterações que podem ocorrer no processo, pode-se citar a impregnação da madeira pelo licor de cozimento e a transformação da madeira em cavacos.

De maneira geral, as madeiras com altas densidades deverão ter menores dimensões de cavacos para facilitar o processo de impregnação, no entanto, com o incremento da densidade a picagem torna-se mais difícil, pois requer maior demanda energética e tende a produzir cavacos pouco uniformes (CARDOSO, 2006).

Madeiras com menor densidade apresentam fibras com menor espessura de parede, dando origem a polpa celulósica mais adequada para produção de papéis utilizados para impressão e escrita. Já polpa celulósica obtida de madeiras mais densas

é mais adequada para atender as indústrias fabricantes dos papéis absorventes (ASSIS, 1996).

Segundo Barrichelo (1983), quando se menciona qualidade da madeira, os trabalhos salientam a densidade básica, pelo fato de ser uma das principais características de avaliação, salientando também a facilidade de amostragem e mensuração. Além da densidade básica, outros parâmetros devem ser considerados para caracterização da qualidade da madeira como: os teores de celulose, lignina e extrativos, bem como as características das fibras, parênquimas e vasos.

A composição química da madeira é bastante complexa e varia entre espécies, entre árvores da mesma espécie e ainda entre diferentes posições de uma mesma árvore. O conhecimento da composição química da madeira destinada a produção de polpa celulósica é de grande valia, uma vez que os dados fornecerão condições para que se estabeleçam melhores parâmetros do processo de polpação.

Segundo Gomide e Colodette (2007), os vários componentes químicos da madeira podem ser agrupados em: carboidratos, substâncias fenólicas, terpenos, ácidos alifáticos, alcoóis, proteínas, aldeídos, entre outros. Entretanto, a fração mais significativa do peso da madeira é representada pelos carboidratos, principalmente celulose e hemiceluloses, e pelas substâncias fenólicas, especialmente lignina. Estes estão relacionados com os aspectos quantitativos de rendimento, demanda da carga de álcali no cozimento da madeira e consumo de químicos no branqueamento da polpa produzida.

Dentre os componentes da madeira, a celulose é o componente mais abundante e o mais importante economicamente, já que é o material de interesse na fabricação do papel (MOKFIENSKI, 2004).

A celulose é um polímero natural, cuja unidade repetitiva é a celobiose, formada por cadeias longas, uniformes, e unida por ligações glicosídicas  $\beta$  (1,4).

O termo “holocelulose” é comumente utilizado para descrever o total de carboidratos presentes nas madeiras. Durante o tratamento químico da madeira para produção de polpa celulósica as hemiceluloses são mais facilmente degradadas e dissolvidas que a celulose, portanto suas porcentagens são sempre menores nas polpas que na madeira, quando comparadas com a celulose (SMOOK, 2002).

Outro importante componente constituinte da madeira é a lignina, polímero de natureza aromática e tridimensional, com alto peso molecular. Localiza-se principalmente na lamela média e na parede secundária. A lignina atua como agente cimentante, promovendo a ligação das fibras através da lamela média e também proporciona às plantas resistência a ataques de natureza biológica (pragas e doenças).

As madeiras que apresentam maiores teores de lignina exigem maior quantidade de álcali para atingir níveis de deslignificação desejáveis nos processos químicos de polpação. Tal fato implica em uma maior degradação dos carboidratos e dissolução dos polissacarídeos de baixo peso molecular, causando redução do rendimento, queda de viscosidade e resistência física da polpa celulósica, além de gerar maior quantidade de sólidos para queima em caldeiras de recuperação (ALENCAR, 2002; QUEIROZ et al., 2004; SANTOS, 2005)

Assim como a lignina, os extrativos são componentes indesejáveis para obtenção de polpa celulósica; estes causam efeito direto no consumo de álcali, no rendimento e na taxa de deslignificação.

Segundo Smook (2002), os extrativos compõem uma extraordinária diversidade de compostos e suas proporções na madeira também variam amplamente. Segundo este autor os extrativos são representados, principalmente, pelos ácidos graxos e resinosos, sendo que diferentes solventes podem ser utilizados na quantificação dos mesmos, porém os mais comuns são o tolueno e diclorometano. Os extrativos podem provocar incrustações (pitch) em tubulações e sujidade na polpa celulósica.

Assim como a composição química da madeira, a determinação das dimensões das fibras é importante na avaliação da qualidade da madeira para obtenção de polpa celulósica, visto que essas dimensões podem nos fornecer uma idéia das futuras propriedades da polpa. Vale salientar que a análise das dimensões das fibras apenas possibilita uma estimativa geral das propriedades da polpa celulósica, uma vez que essas também dependem de outros fatores, como constituição química da madeira e do processo de polpação (PENALBER, 1983).

As características anatômicas que mais se destacam na avaliação da qualidade da madeira são as dimensões e porcentagem das fibras, vasos e parênquimas. Estas

podem influenciar no consumo de energia de refino e nas propriedades físico-mecânicas das polpas celulósicas.

O comprimento médio das fibras de uma determinada polpa é considerado uma propriedade importante, sendo comumente utilizado como índice de qualidade. O número de fibras por grama de polpa está relacionado com o comprimento médio e, conseqüentemente, com o peso das fibras, sendo uma característica que influencia positivamente as propriedades ópticas do papel, dispersão de luz e opacidade, em razão do elevado número de espaços intercelulares, que faz com que a luz atravesse nas interfaces fibra-ar (CARPIM et al., 1987).

Segundo Barrichello e Foelkel (1975), as fibras, os elementos de vasos e os parênquimas são células presentes em madeiras de folhosas, as quais funcionam como tecido de suporte, armazenamento e auxiliam também no transporte de água e nutrientes no tecido vegetal. Os elementos de vasos também favorecem a penetração do licor de cozimento no interior dos cavacos durante o processo de polpação. Os mesmos autores afirmam que variações de densidade básica na madeira estão, geralmente, relacionadas com alterações nas dimensões dos elementos anatômicos da madeira.

Quanto mais densa a madeira, maior é a espessura das paredes celulares e de substância madeira em um mesmo volume. Com isso, a porosidade e a capilaridade ficarão menores e isso tem relação direta com a impregnação dos cavacos pelos reagentes químicos, pois possuem menor espaço para a entrada dos reagentes.

Fibras com paredes espessas deformam-se menos quando sujeitas a vácuo ou prensagem do que as fibras de menor espessura de parede, o que favorece a drenabilidade, podendo ser observadas altas taxas de drenagem. Fibras com paredes finas, provenientes de madeiras de baixa densidade, dão origem a polpas celulósicas e um papel com maior resistência à tração, pela flexibilidade das mesmas, bem como pelo colapsamento das fibras quando expostas a vácuo, com maior interligação entre fibras por maior superfície de contato (OLIVETTI NETO, 2002).

Durante o processo de polpação o licor penetra preferencialmente pela seção transversal da madeira (topo superior e inferior), pois nessa seção temos entre 40 a 45% de poros livres, tornando a penetração mais rápida que nas outras seções

(tangencial e radial). No entanto, quando cessa a penetração a impregnação só continuará por difusão, e nesse momento a espessura da parede das fibras torna-se mais importante (FOELKEL, 2009).

Segundo Cardoso (2006), o tamanho da fibra, o teor de celulose e a densidade básica da madeira são afetados pela idade do povoamento florestal, uma vez que diminui a proporção da madeira juvenil, tanto em peso, quanto em volume.

Entre os critérios para seleção de clones superiores visando à melhoria da qualidade da madeira, a idade de corte é um fator importante, pois se sabe que o estágio de desenvolvimento da planta influencia nas propriedades físico químicas da sua madeira, as quais desempenham papel decisivo nas características da polpa e nas outras propriedades do papel produzido (BILLA et al., 2000).

Pode-se dizer que praticamente todas as propriedades da madeira são afetadas pela idade. Sabe-se que o tecido meristemático cambial, responsável pelo crescimento secundário da árvore, passa por mudanças ao longo dos anos. Essas mudanças ocasionam variações na madeira produzida em cada idade. Como consequência, a madeira produzida nos primeiros anos é significativamente diferente da madeira nas idades mais avançadas (FERREIRA et al., 1979).

Trugilho (1996), relata que o aumento da idade da árvore afeta positivamente o teor de holocelulose da madeira, sua densidade básica e comprimento de fibra e espessura da parede, sendo observado o inverso com o teor de cinzas, lignina e extrativos totais.

Morais (2008), estudou o efeito da idade na qualidade da madeira para celulose em *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com idades de 1 a 8 anos, observou-se que o rendimento de polpação, para número kappa 17, correlacionou-se com o teor de celulose das madeiras avaliadas e, os maiores resultados obtidos para este parâmetro foram alcançados pelas madeiras de cinco anos de idade de ambos os clones.

Alencar e Silva Júnior (2002), também avaliaram a qualidade da madeira para obtenção de polpa celulósica de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com idades de 1 a 7 anos e concluíram que tanto a densidade básica quanto o rendimento foram

correlacionados diretamente com a idade. Foi observada também uma tendência de estabilização do rendimento depurado entre 5 e 6 anos de idade.

Os aspectos relacionados à produtividade florestal e qualidade da madeira de plantios destinados a produção de matéria-prima para produção de polpa celulósica devem considerar as particularidades do processo kraft de polpação.

O processo kraft é o mais utilizado no mundo para produção de polpa celulósica, e tem como objetivo principal a individualização das fibras pela dissolução da lignina presente, principalmente na lamela média das madeiras. Para isso, utiliza-se o hidróxido de sódio (NaOH) e o sulfeto de sódio (Na<sub>2</sub>S), que são os dois reagentes químicos do processo Kraft (GOMIDE, 1979).

O processo kraft foi desenvolvido em 1879 por Dahl, através de modificações no processo soda através da introdução de sulfeto de sódio; com esta modificação Dahl observou que o sulfeto no licor de cozimento acelerava de forma significativa as reações de deslignificação e produzia polpas mais resistentes (SMOOK, 2002).

Uma das características principais do processo kraft é a alta qualidade da celulose obtida. Esta qualidade é avaliada basicamente pelo teor de lignina residual (número kappa), grau de degradação dos carboidratos (viscosidade) e propriedades físico-mecânicas. Porém, estas características podem sofrer alterações de acordo com algumas variáveis do processo como carga alcalina, tempo e temperatura de cozimento, entre outros (SILVA JR., 1994).

O sucesso do processo kraft está relacionado também com as altas resistências e branqueabilidade das polpas celulósicas produzidas, adaptabilidade a praticamente todos os tipos de matéria-prima e tecnologia eficiente para recuperação dos produtos químicos de cozimento. Entretanto, o processo não é seletivo e com a remoção da lignina ocorre a solubilização e degradação de celulose e hemiceluloses, com consequente perda de rendimento e deterioração das propriedades físico-mecânicas da polpa celulósica produzida.

Durante o processo kraft a remoção de hemiceluloses e de lignina favorece a difusão de reagentes para o interior da parede das fibras e conseqüentemente o acesso destes a lamela média provoca, por outro lado, alterações estruturais que vão afetar a resistência intrínseca e a conformidade das fibras. Além disso, as reações dos

polissacarídeos (celulose e hemicelulose), localizados principalmente na parede secundária das células, têm efeito acentuado no rendimento e nas características da polpa, bem como no consumo de reagentes (BASSA, 2002).

Segundo Silva Júnior (1997), o comportamento do processo kraft é determinado pela velocidade de reação e eficiência dos sistemas físicos e químicos envolvidos, pela composição química da madeira e temperatura do licor de cozimento. Aspectos deste comportamento incluem a seletividade e a habilidade de remover a lignina sem ataque extensivo à fração de carboidratos da madeira.

O tempo de cozimento depende do grau de deslignificação que se pretende atingir, sendo este usualmente traduzido pelo número kappa da polpa celulósica. Também a relação entre tempo e temperatura, conhecida como fator H, é uma variável de controle utilizada frequentemente (SILVA JÚNIOR, 2005).

As condições de cozimento são altamente dependentes das propriedades da madeira, como densidade básica e composição química, daí a grande importância de se conhecer as características da madeira utilizada no processo de fabricação da polpa celulósica.

## **2.2 Material e Métodos**

### **2.2.1 Descrição da área**

A madeira utilizada neste estudo foi obtida a partir de um único clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com idades de 4, 5, 6 e 7 anos, provenientes de plantios comerciais da região de Monte Dourado, distrito de Almeirim-PA, entre as coordenadas 0°51'25"S e 52°32'27"W (Figuras 1 e 2). Este material foi coletado em áreas com solos de textura argilosa e arenosa, onde as produtividades médias eram de 30 e 17 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, respectivamente. Considerando-se as idades e os tipos de solo tem-se 8 tratamentos.

A região possui temperatura média anual de aproximadamente 26°C, umidade relativa do ar entre 80 e 85% e precipitação média anual entre 2.000 e 2.500 mm, com o período chuvoso compreendido entre os meses de dezembro e julho. Os solos predominantes são latossolos amarelos (OLIVEIRA et al., 2004).

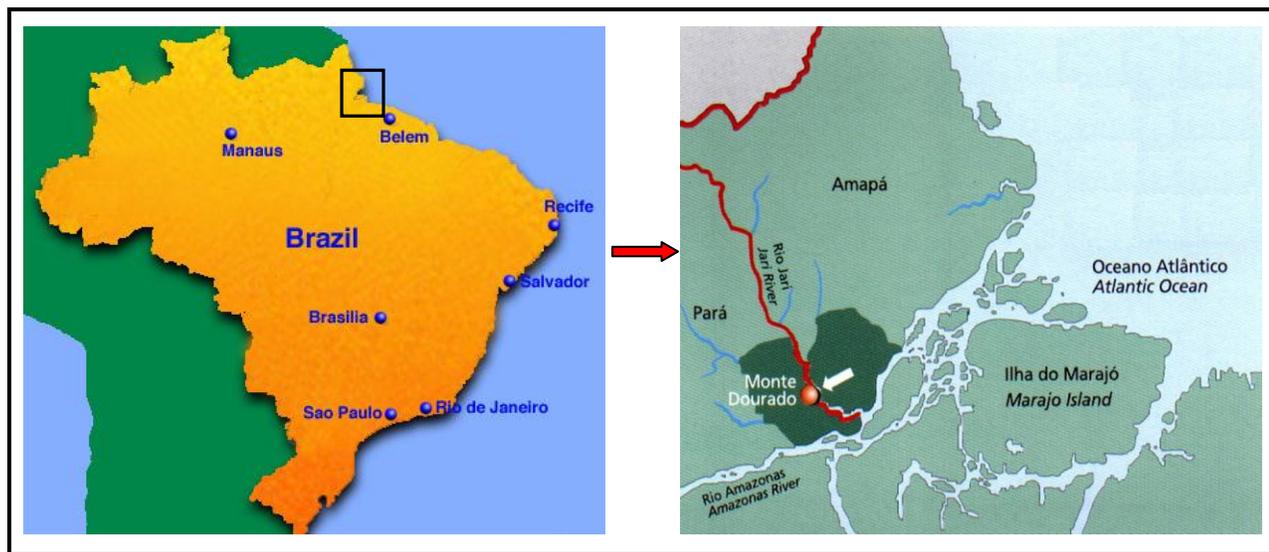


Figura 1 - Procedência do material

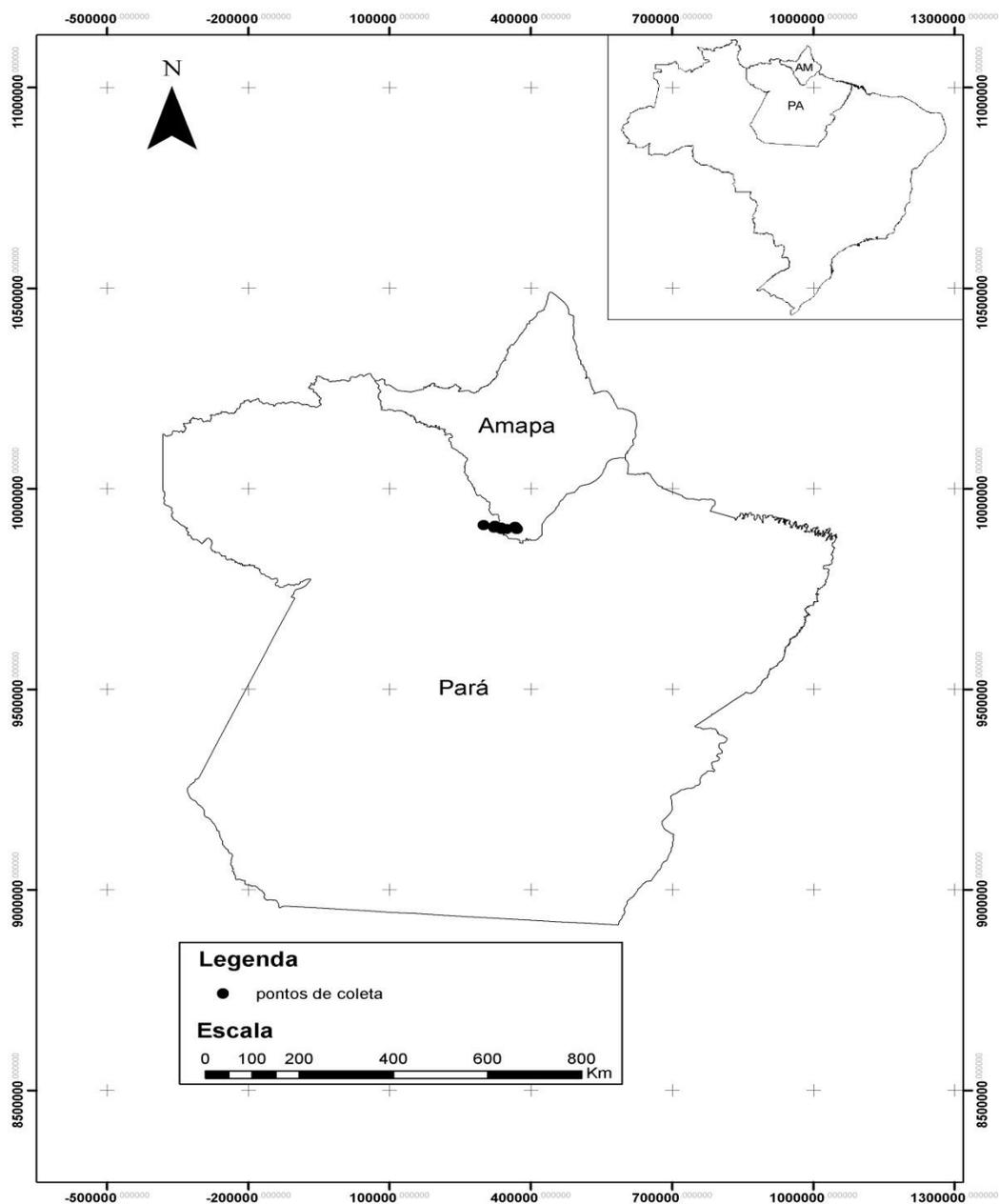


Figura 2 – Localização das árvores coletadas

## 2.2.2 Amostragem

Com base em inventário florestal foram coletadas 10 árvores com diâmetro médio do povoamento do clone híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla* para cada tratamento. As características dos povoamentos estão descritas na tabela 2.

Tabela 2 – Produtividade (IMA) dos diferentes sítios de produção de acordo com a idade

Idade (anos)	Tipo de solo	Textura	IMA ( $m^{-3}ha^{-1}ano^{-1}$ )
4	Areia quartzosa	Arenosa	19,9
4	Latossolo Amarelo	Argilosa	29,3
5	Podzólico Amarelo	Média	35,5
5	Latossolo Amarelo	Argilosa	17,1
6	Podzólico Amarelo	Média	15,5
6	Latossolo Amarelo	Argilosa	33,6
7	Latossolo Amarelo	Média	15,1
7	Latossolo Amarelo	Argilosa	30,9

IMA=Incremento Médio Anual

Cada árvore foi descascada manualmente e dividida em toretes de 2 m de comprimento e retirados 6 discos para densidade básica com aproximadamente 2,65 cm de espessura nas posições correspondentes à base (altura do corte), à altura do peito (1,30 m) e 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do tronco (diâmetro mínimo de 8 cm).

Os toretes foram transformados em cavacos em picador industrial (Figuras 3 e 4), em seguida foram transportados para análise no Laboratório de Química, Celulose e Energia – LQCE da Universidade de São Paulo, em Piracicaba-SP.



Figura 3 - Toretos prontos para a picagem



Figura 4 – Amostra de cavacos

## 2.2.3 Métodos

### 2.2.3.1 Densidade básica e Índice de Heterogeneidade

A densidade básica dos discos foi determinada através do Método da Balança Hidrostática (NBR 11941), e a dos cavacos através do método do Máximo Teor de Umidade (FOELKEL; BRASIL; BARRICHELO, 1971).

Para cada árvore foi calculado o Índice de Heterogeneidade da madeira que procura expressar a maior ou menor variabilidade da densidade no sentido longitudinal, a partir das densidades obtidas dos discos (BARRICHELO; BRITO, 1984).

Segundo os autores, a variação é mais significativa quanto mais próximos estiverem os pontos de amostragem e quanto mais na parte inferior da árvore. Para realização do cálculo são utilizados pesos de acordo com a localização dos discos na árvore:

Peso 4: para a diferença de densidade entre a base e 25% da altura;

Peso 3: para a diferença de densidade entre a base e 50% da altura;

Peso 2: para a diferença de densidade entre a base e 75% da altura; e

Peso 1: para a diferença de densidade entre a base e 100% da altura comercial.

O resultado é expresso como:

$$IH = [A - B]4 + \dots + [A - E] + [B - C]3 + \dots + [B - E] + [C - D]2 + [C - E] + [D - E]$$

Onde:

IH = índice de heterogeneidade;

A = densidade básica dos discos da base da árvores;

B = densidade básica dos discos a 25% da altura da árvores;

C = densidade básica dos discos a 50% da altura da árvores;

D = densidade básica dos discos a 75% da altura da árvores; e

E = densidade básica dos discos a 100% da altura comercial

### 2.2.3.2 Composição química da madeira

Para composição química uma amostra de cavacos de cada tratamento foi transformada em serragem em moinho laboratorial. A serragem foi classificada em conjunto de peneira de 40 e 60 mesh, a fração retida na peneira de 40 mesh foi utilizada para realização das análises.

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

O teor de lignina foi determinado pela norma TAPPI T222.

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

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

### 2.2.3.3 Dimensão das fibras

A dissociação dos elementos anatômicos dos cavacos foi realizada através das seguintes etapas: (i) retirada de pequenos palitos no sentido das fibras de diversos cavacos da mesma amostra para garantir uma boa amostragem; (ii) transferência dos palitos para tubos de ensaio contendo solução composta por 50% de ácido acético, 38% de peróxido de hidrogênio 130 volumes e 12 % de água destilada; (iii) transferência dos tubos para estufa a 60°C por 48h; (iv) remoção da solução macerante e lavagem do material com água destilada; (v) coloração da suspensão das células do lenho; (vi) formação das lâminas com glicerina e lamínula. Para mensuração das dimensões de fibras as lâminas com as células do lenho foram examinadas em microscópio de luz e coletadas imagens das fibras através da câmera digital CCD para mensuração de comprimento (ampliação de 25x), largura e diâmetro do lume (ampliação de 400 x). As medições foram realizadas com o programa ImageTool. Para o cálculo da espessura de parede da fibra foi utilizada a seguinte formula:

$$Ep = \frac{Lf - Dl}{2}$$

Sendo:

$E_p$  = Espessura de parede ( $\mu\text{m}$ )

$L_f$  = Largura da fibra ( $\mu\text{m}$ )

$D_l$  = Diâmetro do lume ( $\mu\text{m}$ )

#### **2.2.3.4 Classificação granulométrica**

Os cavacos foram classificados em conjuntos de peneiras vibratórias, onde foram removidos os cavacos de tamanho muito grande (over-size) e os muito finos, pois estes prejudicam o processo de polpação.

Para classificação dos cavacos foram utilizadas peneiras de furos com dimensões de 29, 22, 16, 10 e 5 mm, e peneiras de barras com 2, 4, 6 e 8 mm. Na peneira de furos foram selecionados os cavacos que passaram pelas peneiras de 29 mm e ficaram retidos nas peneiras de 22, 16 e 10 mm; e na peneira de barras foram selecionados os cavacos que passaram pela peneira de 8mm e ficaram retidos nas peneiras de 6 e 4 mm.

#### **2.2.3.5 Dimensões dos cavacos**

Após a classificação foram determinadas as dimensões dos cavacos (comprimento, largura e espessura). Para cada amostra foram pesados 250 g de cavacos, estes foram medidos com paquímetro digital e separados em classes com amplitude de 1 mm para comprimento e largura e 0,5 mm para espessura.

Após a separação dos cavacos em classe, estes foram colocados em estufa a  $103 \pm 2$  °C até obterem peso constante. Com base no peso seco total e no peso de cada classe foi determinada a porcentagem em peso de cada classe de cavacos medidas.

### 2.2.3.6 Polpação

Os cozimentos foram realizados em digestor com circulação forçada com dois vasos com capacidade de 10 litros cada, de acordo com as condições descritas na tabela 3, variando-se apenas a carga de álcali para obtenção de polpa com kappa 18,5  $\pm$  0,5.

Tabela 3 - Condições de cozimento no processo kraft

Parâmetros	Condições
Cavacos a.s. (g)	1000
Temperatura (°C)	166
Tempo de impregnação (min)	60
Tempo de cozimento (min)	85
Álcali Ativo (% , como NaOH)	21 a 25
Sulfidez (%)	25
Relação licor/madeira (L kg <sup>-1</sup> )	4/1

a.s. = absolutamente seco

Após cada cozimento as polpas foram lavadas com água em excesso até todo licor existente ser visualmente removido. Esta etapa foi conduzida utilizando-se sacos de microfibras e água destilada. Em seguida as amostras de polpa foram centrifugadas, desagregadas e armazenadas em sacos de polietileno sob refrigeração a 4 $\pm$ 2°C, para realização de análises posteriores.

### 2.2.3.7 Parâmetros determinados

Os parâmetros determinados em cada amostra de polpa e licor negro estão descritos na tabela 4:

Tabela 4 - Parâmetros determinados no processo de polpação

Parâmetro	Normas
Rendimento bruto	Relação entre peso seco da celulose e peso seco da madeira
Rendimento depurado	Relação entre peso seco da celulose depurada e peso seco da madeira
Teor de rejeitos	Relação entre peso seco dos rejeitos (material retido em peneira com fenda de 0,2 mm de depurador laboratorial) e peso seco da madeira
Número kappa	Tappi Methods – T236cm-85
Teor de lignina residual	Lignina klason
Viscosidade	Norma TAPPI –T230 cm-94
Ác. hexenurônicos	Chai et al., 2001
Álcali Ativo Residual	Norma TAPPI - T625
pH	Leitor de pH ou pHmetro digital
Teor de sólidos totais	Norma TAPPI – T650

Além dos parâmetros descritos nas tabela 4 foram determinados também o teor de sólidos secos, o consumo específico de madeira e o incremento médio de celulose, de acordo com as expressões a, b e c, respectivamente:

a) Teor de sólidos secos

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

Onde:

Tss/odt = teor de sólidos secos gerados por tonelada de celulose (tss odt<sup>-1</sup>);

RB = rendimento bruto (%);

RD = rendimento depurado (%).

b) Consumo específico de madeira

$$CE = \frac{1000}{RD \times DB}$$

Onde:

CE = Consumo específico de madeira ( $\text{m}^3 \text{odt}^{-1}$ );

RD = Rendimento depurado (%)

DB = densidade básica da madeira ( $\text{kg m}^{-3}$ )

c) Incremento Médio Anual de Celulose

$$IMACEL = \frac{IMA}{CE}$$

Onde:

IMACEL = Incremento médio anual de celulose ( $\text{odt ha}^{-1}$ )

IMA = Incremento Médio Anual ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ )

CE = Consumo específico de madeira ( $\text{m}^3 \text{odt}^{-1}$ )

### 2.2.3.8 Branqueamento

As polpas foram branqueadas utilizando-se a seqüência O-D<sub>0</sub>-Ep-D<sub>1</sub>, visando à obtenção de alvura 88% ISO. As condições gerais de branqueamento estão descritas na tabela 5.

Tabela 5 - Condições empregadas no branqueamento das polpas celulósicas

Condições	Estágios de branqueamento			
	Pré O	D	Ep	D <sub>1</sub>
Consistência (%)	10	10	10	10
Temperatura (°C)	95	70	70	70
Tempo (min)	60	60	60	180
Fator kappa	-	0,24	-	-
Pressão de O <sub>2</sub> (kg cm <sup>-2</sup> )	5	-	-	-
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (kg t <sup>-1</sup> )	-	-	5	-
ClO <sub>2</sub> (kg t <sup>-1</sup> )	-	-	-	4
NaOH (kg t <sup>-1</sup> )	20	-	8	-
O <sub>2</sub> (kg t <sup>-1</sup> )	20	-	-	-
pH final	±11	±3	±10	±4

A pré-deslignificação com oxigênio foi realizada em reator/misturador Quantum-Mark V com amostras de 250 g de polpa absolutamente secos. A polpa foi depositada no reator na consistência adequada e aquecida até a temperatura de 90°C. Atingida a temperatura, e sob o efeito de agitação constante, injetou-se o oxigênio. Terminada a reação, o sistema foi despressurizado e foram coletadas amostras do licor residual para análises pertinentes. A polpa foi transferida para o descarregador de polpa e então lavada com o equivalente a 9m<sup>3</sup> de água destilada por tonelada de polpa.

O branqueamento com dióxido de cloro foi efetuado em sacos de polietileno com amostras de 200g (D0) e 150g (D1) de polpa absolutamente secas, nas condições apresentadas na Tabela 5. O requerimento de ácido sulfúrico ou hidróxido de sódio para controle do pH foi determinado em estudo prévio, com mini-amostras de polpa. Após mistura manual, em sacos de polietileno, o material foi aquecido em forno de microondas por um minuto e transferido para um banho de vapor com controle de temperatura, onde foi mantido pelo tempo pré-estabelecido. Terminada a reação, foram extraídas amostras de licor residual para análises pertinentes. A polpa foi então lavada com o equivalente a 9 m<sup>3</sup> de água destilada por tonelada de polpa seca.

O estágio com peróxido de hidrogênio foi realizado em sacos de polietileno com amostras de 180g de polpa absolutamente secos. Após homogeneização manual, as amostras foram aquecidas em forno de micro-ondas por 1 minuto e em seguida transferidas para banho-maria termostaticado, onde foram mantidas pelo tempo estabelecido. Terminadas as reações, foram extraídas amostras de licor residual para análises de pH e residuais de dióxido cloro e peróxido de hidrogênio. A seguir as polpas foram lavadas com o equivalente a 9 m<sup>3</sup> de água destilada por tonelada de polpa seca.

### 2.2.3.9 Refino e testes físicos

As polpas branqueadas foram avaliadas em quatro níveis de refino (0, 750, 1500 e 3000 revoluções), utilizado-se moinho PFI. Nas polpas refinadas foi determinado o grau de drenabilidade (°SR) a temperatura de 20° C e formadas folhas para análise de testes físicos. Estas folhas foram aclimatizadas (23 ± 1°C e 50 ± 1% de UR) por um período de 12 horas. Em seguida foram realizados os testes físico-mecânicos de acordo com a tabela 6:

Tabela 6 - Parâmetros e normas para testes físico-mecânicos

Parâmetro	Normas
Drenabilidade (°SR)	ISO 5267-1
Volume Específico (cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> )	ISO 534
Resistência ao Ar (s/100 mL)	ISO 5636-5
Índice de Tração (Nm g <sup>-1</sup> )	ISO 1924-3
Alongamento (%)	ISO 1924-3
Índice de Estouro (kPam <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	ISO 2758
Índice de Rasgo (mNm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	ISO 1974
Opacidade (%)	ISO-2470
Viscosidade (cm <sup>3</sup> .g <sup>-1</sup> )	TAPPI T 230
Alvura ISO (%)	ISO 2470

### **2.2.3.10 Delineamento experimental e análise estatística**

O delineamento experimental utilizado no estudo foi o Fatorial. Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e, posteriormente, comparados estatisticamente entre si através do teste de Tukey com nível de significância de 1%. As análises dos dados foram realizadas através do software estatístico SAS 9.1 for Windows (SAS INSTITUTE, 2002/2003).

## **2.3 Resultados e Discussão**

### **2.3.1 Densidade básica da madeira e Índice de Heterogeneidade**

Para indústria de celulose e papel, uma avaliação adequada da densidade básica fornece indicações bastante precisas a respeito da velocidade de impregnação dos cavacos pelo licor de cozimento e rendimento do processo, pois esta propriedade da madeira está associada a outras características como a espessura da parede celular e composição química.

Os resultados de densidade básica encontrados nos discos em diversas alturas da árvore (Tabela 7), e também nas amostras de cavacos (Figura 5) mostram uma correlação positiva entre densidade básica e idade da madeira. Isso ocorre porque o tecido meristemático cambial passa por mudanças em função da idade da árvore, causando alterações na madeira produzida.

Tabela 7 – Densidade básica da madeira - discos

Idade (Anos)	Produtividade	Densidade básica dos discos (g cm <sup>-3</sup> )					
		Base	DAP	25%	50%	75%	100%
4	Baixa	0,575	0,527	0,519	0,515	0,535	0,537
	Alta	0,542	0,506	0,521	0,494	0,509	0,485
5	Baixa	0,532	0,513	0,517	0,541	0,548	0,535
	Alta	0,551	0,493	0,503	0,503	0,507	0,508
6	Baixa	0,588	0,521	0,520	0,526	0,523	0,572
	Alta	0,544	0,515	0,517	0,545	0,545	0,555
7	Baixa	0,631	0,607	0,604	0,604	0,590	0,592
	Alta	0,608	0,618	0,588	0,584	0,585	0,568

Segundo Foelkel et al., (1976), as principais variações na qualidade da madeira formada no período inicial de crescimento (madeira juvenil) em relação à madeira adulta são: o comprimento de fibra aumenta e o ângulo fibrilar diminui; a proporção de lenho tardio e a espessura de parede celular aumentam, com conseqüência aumentam a densidade básica e resistência da madeira.

Observou-se correlação negativa entre densidade básica e taxa de crescimento das árvores (Figura 1). Tal fato foi relatado também por outros pesquisadores (FERREIRA et al., 1979; MIGLIORINI et al., 1988).

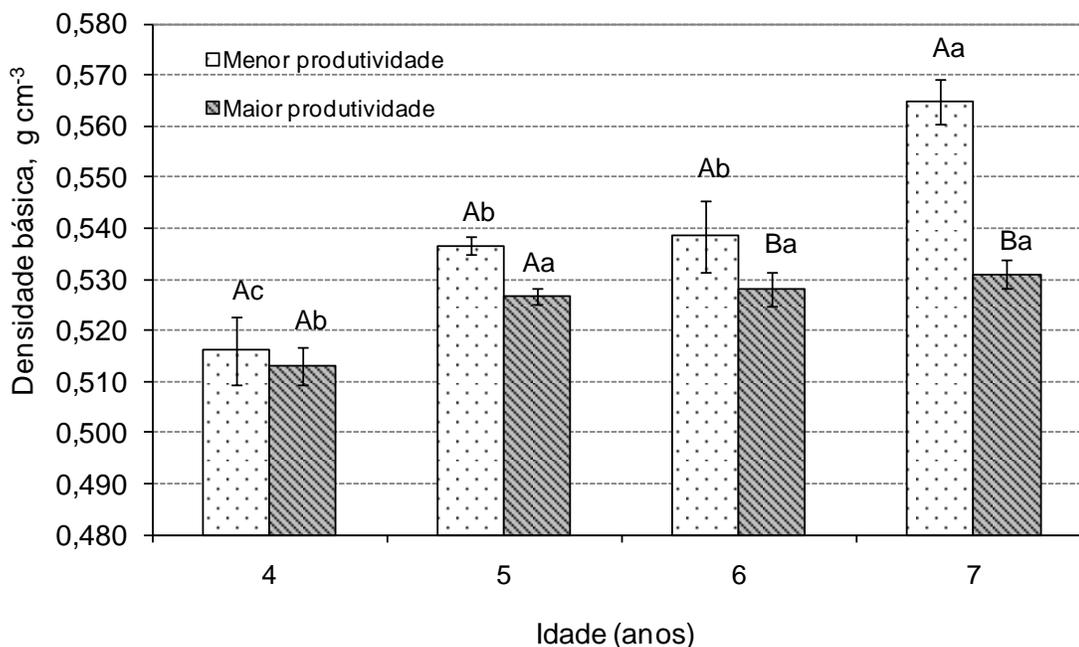


Figura 5 – Densidade básica da madeira - cavacos

Pelo teste de Tukey ( $P > 0,01$ ), as médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem nas mesmas idades em diferentes sítios e, letras minúsculas iguais não diferem nas diferentes idades nos mesmos sítios.

A densidade básica da madeira oriundas de áreas de menor produtividade aumentou 9,5% dos 4 ao 7 anos, enquanto que nas áreas de alta produtividade esse incremento foi de apenas 3,5%, o que é indicativo de interação entre idade e produtividade do sítio.

De maneira geral, o aumento da densidade favorece um menor consumo específico de madeira na fábrica, mas por outro lado, dificulta o processo de picagem, assim como a impregnação e penetração dos licores de cozimento, o que reflete no grau de deslignificação e rendimento depurado da polpa.

Independente da densidade básica da madeira, um dos critérios desejável é a homogeneidade do material, por facilitar o controle do processo e proporcionar uma polpa celulósica de melhor qualidade; diante disso, calculou-se o Índice de heterogeneidade (Figura 6).

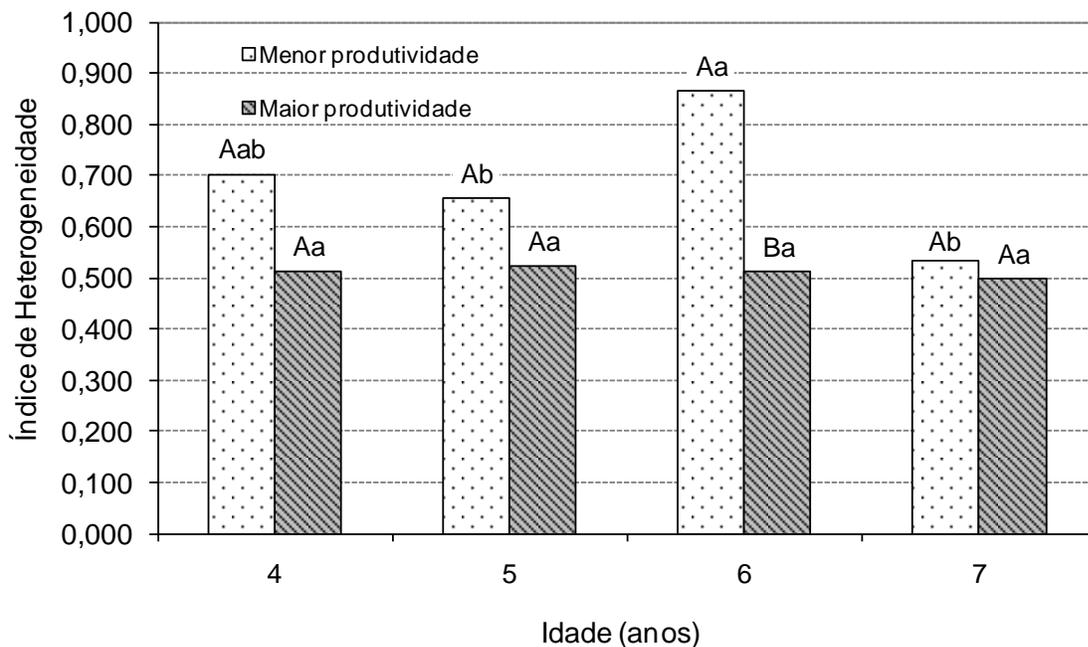


Figura 6 – Índice de Heterogeneidade para cada idade em diferentes ritmos de crescimento

Pelo teste de Tukey ( $P > 0,01$ ), as médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem nas mesmas idades em diferentes sítios e, letras minúsculas iguais não diferem nas diferentes idades nos mesmos sítios.

Constatou-se que os materiais que apresentaram maiores taxas de crescimento apresentaram menores índices de heterogeneidade, o que significa maior homogeneidade da densidade básica no sentido longitudinal, quando comparadas as árvores que cresceram mais lentamente.

Duarte (2006) encontrou índices de heterogeneidade em *E.grandis* x *E. urophylla* de 0,282, 0,330 e 0,400 com procedências de Mucuri-BA, Itatinga-SP e São Miguel-SP, respectivamente. Segundo a mesma autora a redução do índice de heterogeneidade pode ser considerada um reflexo da intensidade das atividades de melhoramento genético e manejo florestal.

### **2.3.2 Composição química da madeira**

A determinação da composição química da madeira é fundamental para avaliação da qualidade da madeira utilizada na produção de celulose, pois tem influência direta no processo. As diferenças mais intensas foram notadas no teor de extrativos em relação às diferentes idades. Enquanto a madeira de 4 anos em áreas de baixa produtividade apresentou 4,39% a madeira de 7 anos apresentou 5,74% na mesma área (Tabela 8), o que evidencia o efeito da idade na composição química. No entanto, não houve diferença nos teores de extrativos em função da produtividade da florestal.

O aumento no teor de extrativos observado com o aumento da idade da árvore pode estar relacionado a formação do cerne.

Segundo Tomazello Filho, (2006) na formação do cerne os vasos são bloqueados por tiloses ou por gomas e as células do parênquima radial produzem polifénóis (taninos), conferindo coloração e resistência da madeira ao ataque de fungos e insetos. Daí a maior dificuldade de penetração do licor na madeira, já que muitos poros estão obstruídos.

Tabela 8 – Composição química das madeiras

Idade (anos)	Produtividade	Extrativos totais	Lignina solúvel	Lignina insolúvel	Lignina total	Holocelulose
4	Baixa	4,39 Ab	25,42	4,25	29,66 a	65,95 a
4	Alta	4,23 Ab	25,52	4,38	29,90 a	65,87 a
5	Baixa	4,63 Ab	25,18	4,18	29,36 a	66,00 a
5	Alta	4,45 Ab	25,57	4,04	29,60 a	65,95 a
6	Baixa	4,60 Ab	25,47	3,94	29,40 a	66,00 a
6	Alta	4,29 Ab	25,18	4,08	29,26 a	66,45 a
7	Baixa	5,74 Aa	25,90	3,82	29,72 a	64,53 a
7	Alta	5,45 Aa	25,62	3,88	29,50 a	65,05 a

Para cada parâmetro pelo teste de Tukey ( $P>0,01$ ) as médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem nas mesmas idades em diferentes sítios e, letras minúsculas iguais não diferem nas diferentes idades nos mesmos sítios.

Alto teor de extrativos é uma característica indesejável para madeiras destinadas à produção de celulose. Segundo Carvalho (1998), o aumento de extrativos na madeira, além de exigir maior carga de reagentes, também aumenta o potencial de formação de depósitos de “pitch” em equipamentos, principalmente telas e feltros, e ainda, afetam o potencial de absorção de líquidos do papel.

O teor de lignina na madeira tem alta correlação com as condições de cozimento e sua eficiência de deslignificação. Ferreira et al. (2006) avaliaram a qualidade da madeira de 9 clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com 7 anos de idade e encontraram teores de lignina e extrativos variando de 29,1 a 30% e 1,09 a 3,74%, respectivamente. Isso demonstra que os teores de lignina encontrados nos materiais estudados estão de acordo com as madeiras utilizadas para produção de celulose no Brasil. Já o teor de extrativos está acima dos resultados encontrados por Ferreira et al. (2006) e também por outros autores que estudaram as mesmas idades (ALENCAR, 2002; CARVALHO, 1998; MORAIS, 2008).

De maneira geral, o teor de holocelulose aumenta com a idade da árvore, mas não houve diferença entre idades e produtividades. Os valores encontrados são

ligeiramente inferiores aos relatados por outros autores que analisaram madeiras de eucalipto; Almeida (2003) encontrou 68,15 % em madeira com 7 anos, Duarte (2006) encontrou 65,96 e 72,82% para 5 e 6 anos, respectivamente, e Alencar (2002) encontrou as seguintes porcentagens: 66,71; 65,62; 67,54 e 69,90 para 4, 5, 6 e 7 anos respectivamente.

Os teores de celulose e hemicelulose têm grande importância do ponto de vista de seleção de madeiras para produção de celulose, pois de acordo com Milanez et al. (1982) podemos definir o uso das polpas dependendo destas proporções, sendo madeiras com altos teores de celulose mais adequadas para fabricação de polpa celulósica destinada à produção de papéis tipo tissue; e, madeiras ricas em hemiceluloses mais favoráveis à produção de polpa celulósica destinada a obtenção de papéis de imprimir e escrever.

De maneira geral, as variações observadas nas características químicas refletem a influência da atividade fisiológica das árvores, visto que a idade influenciou a composição química da madeira.

### **2.3.3 Dimensões das fibras**

As dimensões das fibras são parâmetros importantes para produção de celulose, pois nos fornecem indicações importantes das propriedades da celulose e sua adequação na fabricação de um determinado tipo de papel.

Para a fabricação de celulose as dimensões das fibras que mais se destacam são: o comprimento, a largura, o diâmetro do lume e a espessura da parede celular.

O comprimento das fibras é influenciado pela idade da árvore conforme já foi relatado por diversos autores. Mas os resultados apresentados na tabela 9 não mostraram padrões definidos de variação em função da idade e produtividade.

Tabela 9 - Dimensões das fibras

Idade (anos)	Produtividade	Comprimento	Largura	D. Lume	E. Parede
		-----mm-----	-----µm-----		
4	Baixa	0,90 Aa	16,02 Aa	8,10 Aa	3,70 Ab
4	Alta	0,91 Aab	16,81 Aa	10,86 Ba	3,23 Ab
5	Baixa	0,78 Ab	14,93 Aa	6,32 Aa	4,29 Aab
5	Alta	0,90 Bb	15,60 Aa	7,58 Ab	4,00 Aab
6	Baixa	0,94 Aa	15,22 Aa	7,89 Aa	3,76 Ab
6	Alta	0,95 Aab	17,29 Ba	10,87 Ba	3,41 Ab
7	Baixa	0,93 Aa	15,47 Aa	6,71 Aa	4,73 Aa
7	Alta	1,00 Ba	17,47 Ba	8,96 Bab	4,50 Aa

D = diâmetro; E = espessura

Para cada parâmetro pelo teste de Tukey ( $P > 0,01$ ) as médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem nas mesmas idades em diferentes sítios e, letras minúsculas iguais não diferem nas diferentes idades nos mesmos sítios.

Sabe-se também que a espessura da parede celular está relacionada com a densidade básica da madeira, conforme foi constatado na madeira de 7 anos, que foi a que apresentou maior densidade básica (Figura 5) e também maior espessura de parede (Tabela 9). Os demais materiais não apresentaram diferença na espessura de parede, o que pode ser justificado pela proximidade das idades estudadas.

O diâmetro do lume e a largura das fibras apresentaram correlação positiva com o aumento da produtividade em praticamente todas as idades (tabela 9), o que está em consonância com a literatura. Acredita-se que isso esteja relacionado a eficiência de absorção de água e nutrientes, ou seja, se a planta sente dificuldade em absorvê-los, o processo fisiológico de formação da fibra é reduzido para minimizar o gasto de energia, dando origem a fibras atrofiadas.

As polpas produzidas com fibras de menor espessura de parede apresentam maior facilidade de refino, pois as ligações entre fibras são mais favoráveis devido à maior área de contato.

Embora, as polpas com fibras com maior espessura de parede e maior densidade básica apresentem maior dificuldade de refino e desfavoreçam as ligações

entre fibras, pode-se alcançar resultados positivos quando se depende de drenagem da polpa celulósica eficiente no processamento, ou quando se pretende produzir papéis de alta opacidade ou alto volume específico (WEHR, 1991).

#### **2.3.4 Dimensões dos cavacos**

A transformação da madeira em cavacos é necessária para que aumente a superfície de contato da madeira com o licor, no entanto as dimensões desses cavacos são fundamentais para que ocorra boa impregnação. Uma impregnação adequada garante melhor eficiência na deslignificação, possibilitando o emprego de condições mais brandas com menores dosagens de químicos no cozimento e no branqueamento.

Segundo Foelkel (2009) quanto menores forem os cavacos, maior será a superfície para entrada do licor, entretanto a produção de cavacos de dimensões muito pequenas não é totalmente favorável, pois gera muita serragem e traz danos mecânicos as fibras, além de consumirem licor de cozimento e prejudicar o rendimento na conversão em celulose. Além disso, os cavacos muito finos resultam em maior quantidade de sólidos no licor negro, o que reduz a capacidade de produção de polpa celulósica quando a caldeira de recuperação é o fator limitante da unidade industrial.

Cavacos superdimensionados implicam na utilização de maior carga alcalina e maior tempo de cozimento, o que resulta em menor rendimento, aumento no teor de rejeitos e menor viscosidade da polpa, ocasionada pela maior degradação das cadeias celulósicas.

Nas tabelas 10, 11 e 12 são apresentados os resultados das dimensões dos cavacos utilizados neste trabalho.

Tabela 10 - Comprimento dos cavacos

Idade Anos	Produtividade	Média	Comprimento	Comprimento	Desvio	CV
		ponderada	mínimo	máximo	padrão	
		-----mm-----				%
4	Baixa	25,25	14,63	52,66	4,37	17,96
	Alta	27,56	15,05	39,97	4,76	18,26
5	Baixa	25,95	14,31	43,12	4,47	18,12
	Alta	26,92	15,35	48,18	4,79	18,79
6	Baixa	24,43	14,04	44,21	3,81	16,15
	Alta	23,63	15,24	36,29	4,01	16,98
7	Baixa	25,14	14,77	40,87	4,14	17,33
	Alta	26,49	15,17	38,97	4,04	15,86

CV =Coeficiente de variação

Tabela 11 - Espessura dos cavacos

Idade Anos	Produtividade	Média	Espessura	Espessura	Desvio	CV
		ponderada	mínima	máxima	padrão	
		-----mm-----				%
4	Baixa	3,94	1,34	9,44	1,04	28,36
	Alta	4,25	1,61	7,20	1,08	27,70
5	Baixa	3,81	1,66	6,86	0,89	24,92
	Alta	3,99	1,65	7,31	0,95	26,25
6	Baixa	3,70	1,37	7,65	0,86	25,60
	Alta	3,43	1,11	6,50	0,90	28,92
7	Baixa	3,77	1,54	7,21	0,93	26,59
	Alta	4,06	1,49	7,69	0,96	25,37

CV =Coeficiente de variação

Tabela 12 - Largura dos cavacos

Idade Anos	Produtividade	Média	Largura	Largura	Desvio	CV
		ponderada	mínima	máxima	padrão	
		-----mm-----				%
4	Baixa	20,25	10,11	37,73	5,05	26,13
	Alta	19,38	10,87	42,75	4,36	23,62
5	Baixa	18,77	10,2	32,61	4,08	22,85
	Alta	19,52	9,13	33,58	4,32	23,64
6	Baixa	20,38	10,86	34,14	4,44	23,45
	Alta	19,17	10,17	39,22	4,24	23,46
7	Baixa	18,95	10,1	34,00	3,89	21,62
	Alta	19,65	12,07	41,5	4,52	24,65

CV =Coeficiente de variação

Inúmeros trabalhos relatam que para a produção de polpa celulósica, os cavacos devem preferencialmente apresentar espessura entre 3 a 6 mm e comprimento de 10 a 30 mm. Em anexo são apresentadas as distribuições por classes de comprimento (A1 a A8), espessura (A9 a 15) e largura dos cavacos (C16 a 24).

Apesar dos cavacos já terem sido classificados, ainda foram encontradas diferentes classes de comprimento, o que pode ser justificado por variações no picador, por exemplo, no ângulo das facas e/ou desgastes das mesmas em função do tempo de uso.

É importante ressaltar que além das dimensões dos cavacos, existem outros fatores que também influenciam na impregnação e distribuição dos produtos químicos nos cavacos da madeira, como: temperatura do licor, relação licor/madeira, concentração alcalina do licor, umidade dos cavacos e a estrutura da madeira. Por exemplo, o licor penetra mais fácil na madeira de lenho inicial, que na de lenho tardio, pois possui maior diâmetro do lume e maior número de pontuações.

A espessura dos cavacos por muitos anos foi considerada o parâmetro mais importante por vários autores. Segundo Andrade (1978) a difusão do licor para o interior do cavaco ocorre em todas as direções e a espessura é a de menor dimensão (4 a 5

vezes menor que o comprimento e a largura), logo a maior parte dos agentes de deslignificação será transportada na direção cuja distância seja menor, visto que as diferenças de velocidade nestas direções são pequenas.

No entanto, Foelkel (2009) destaca que tão importante como à espessura é exatamente o comprimento dos cavacos, pois o licor penetra preferencialmente pela seção transversal da madeira (topo superior e inferior, olhando no sentido das fibras da madeira). Nessa seção temos entre 40 a 45% de poros livres, por isso a penetração é mais rápida que nas outras seções (tangencial e radial). No entanto, quando cessa a penetração a impregnação só continuará por difusão, e nesse momento a espessura ganha muita importância.

A largura foi à dimensão que apresentou maior heterogeneidade. Tal fato pode estar relacionado a um desequilíbrio no processo de picagem, tais como diferentes tamanhos de toras, densidade básica da madeira, teor de umidade, entre outros. Por outro lado, sabe-se que a largura não influencia muito no processo de polpação.

Os resultados das dimensões dos cavacos mostram que de maneira geral, há uma uniformidade do material, principalmente nas dimensões de espessura e comprimento, portanto a qualidade dos cavacos não deve ser considerada causa de variações nos resultados obtidos na etapa de polpação.

### **2.3.5 Polpação**

Os processos químicos de produção de celulose se baseiam em reações de dissolução dos agentes que mantêm as fibras unidas, presentes principalmente na lamela média. Em processos alcalinos de polpação, a carga de reagentes utilizada no processo é dependente de vários parâmetros, entre eles pode se destacar: a constituição química e anatômica da madeira; a densidade básica; as dimensões e qualidade da impregnação dos cavacos; tempo e temperatura utilizados no cozimento; e grau de deslignificação desejado.

Os resultados obtidos na etapa de avaliação do desempenho dos materiais considerados neste trabalho frente ao processo kraft de polpação mostram que madeiras provenientes de áreas com menores produtividades e com maiores idades, exigiram maiores cargas de álcali (Figura 7) para o mesmo grau de deslignificação

( $\kappa = 18 \pm 0,5$ ), o que pode ser justificado por apresentarem maiores densidades e maiores teores de extrativos.

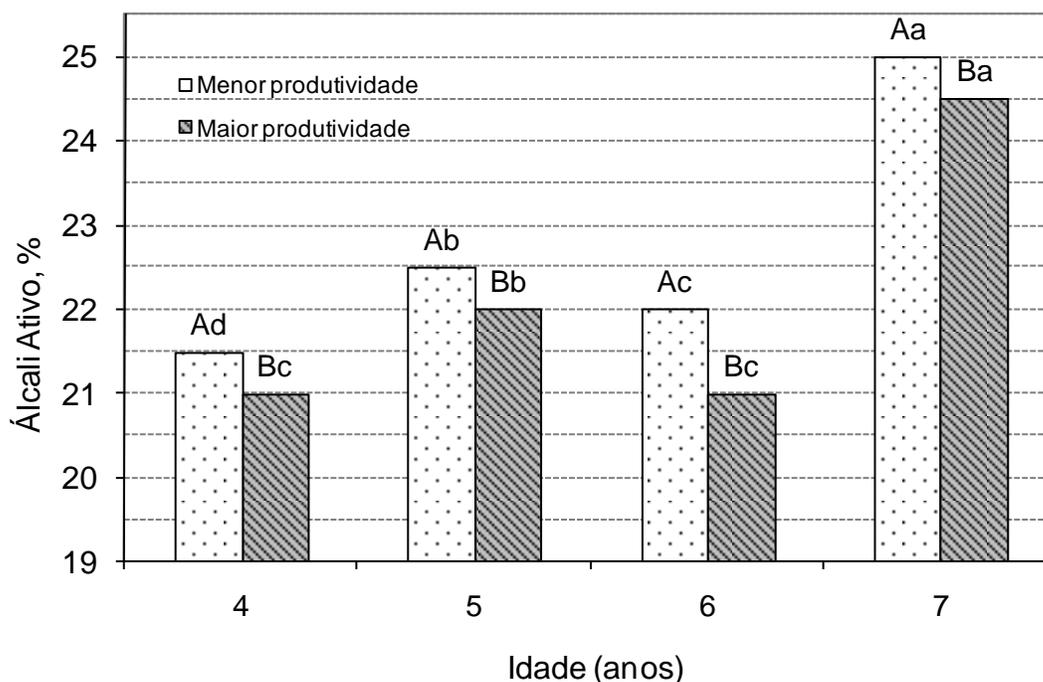


Figura 7 – Carga alcalina necessária para grau de deslignificação  $18 \pm 0,5$

Pelo teste de Tukey ( $P > 0,01$ ), as médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem nas mesmas idades em diferentes sítios e, letras minúsculas iguais não diferem nas diferentes idades nos mesmos sítios.

Como consequência da alta carga de álcali utilizada observou-se redução do rendimento depurado (Figura 8) e de viscosidade (Figura 9) no material proveniente das áreas de menores produtividades, que são também as que apresentaram maiores densidades. Este comportamento está associado à perda de polissacarídeos, principalmente os de baixo peso molecular, ocasionado pela degradação e dissolução dos mesmos. Tal fato também foi observado por Carvalho et al. (1998), Queiroz et al. (2004) e Molkfienski (2004).

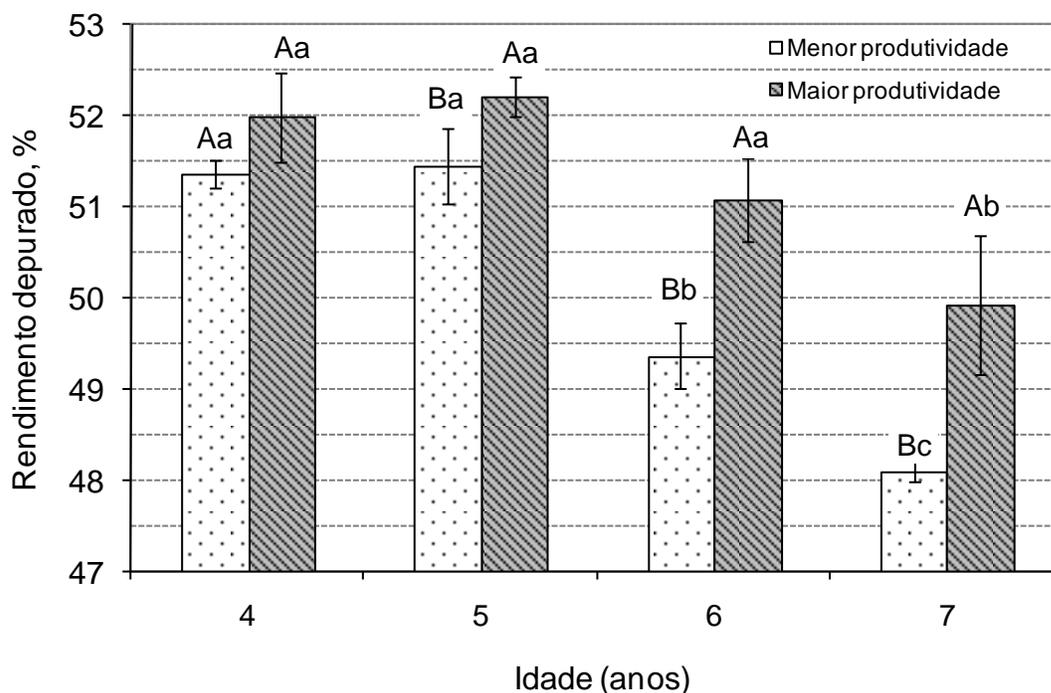


Figura 8 – Rendimento depurado

Pelo teste de Tukey ( $P > 0,01$ ), as médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem nas mesmas idades em diferentes sítios e, letras minúsculas iguais não diferem nas diferentes idades nos mesmos sítios.

Em geral, as madeiras avaliadas apresentaram rendimentos superiores a 50%, com exceção das madeiras com idade de 6 anos provenientes de áreas com baixa produtividade e com 7 anos, independente da produtividade.

A correlação negativa entre rendimento depurado e a carga alcalina aplicada já era esperada, pois, sabe-se que uma das principais hemiceluloses da madeira de eucalipto, as xilanas, é facilmente solúveis em álcali, o que pode justificar a perda de rendimento.

Segundo Silva Júnior (1996) o maior consumo de álcali observado para madeiras com elevada densidade pode ser explicado pelo fato de que tais madeiras tendem a apresentar fibras mais espessas, menor volume de tecido parenquimático e ainda menor frequência de vasos que muitas vezes podem estar obliterados por tilos. Estas características implicam em maior dificuldade de penetração do licor de

cozimento nos cavacos, dificultando assim um cozimento uniforme, o que traz como resultado uma polpa com alto teor de rejeitos, contribuindo para redução do rendimento.

Assim, as madeiras com maiores taxas de crescimento e com idades de 4 e 5 anos foram as que apresentaram melhores resultados de rendimento depurado. Segundo Bassa (2006) o rendimento depurado exerce influência sobre a geração de sólidos no licor de cozimento, sobre o consumo específico de madeira e conseqüentemente sobre os custos de produção, portanto quanto maior o rendimento depurado menor será o teor de sólidos, consumo de madeira e custos de produção.

O teor de rejeito observado nas polpas obtidas neste trabalho foi desprezível em função da elevada carga alcalina requerida para atingir o nível de deslignificação especificado sob as condições de tempo e temperatura de cozimento estabelecidas; conseqüentemente os rendimentos brutos foram praticamente iguais aos rendimentos depurados.

O processo kraft de polpação não é seletivo para lignina e com isso a fração de carboidratos da madeira é indesejavelmente atacada; o grau de degradação das fibras é medido através da viscosidade das polpas celulósicas (Figura 33), que está relacionada com o grau de polimerização dos carboidratos (celulose e hemicelulose).

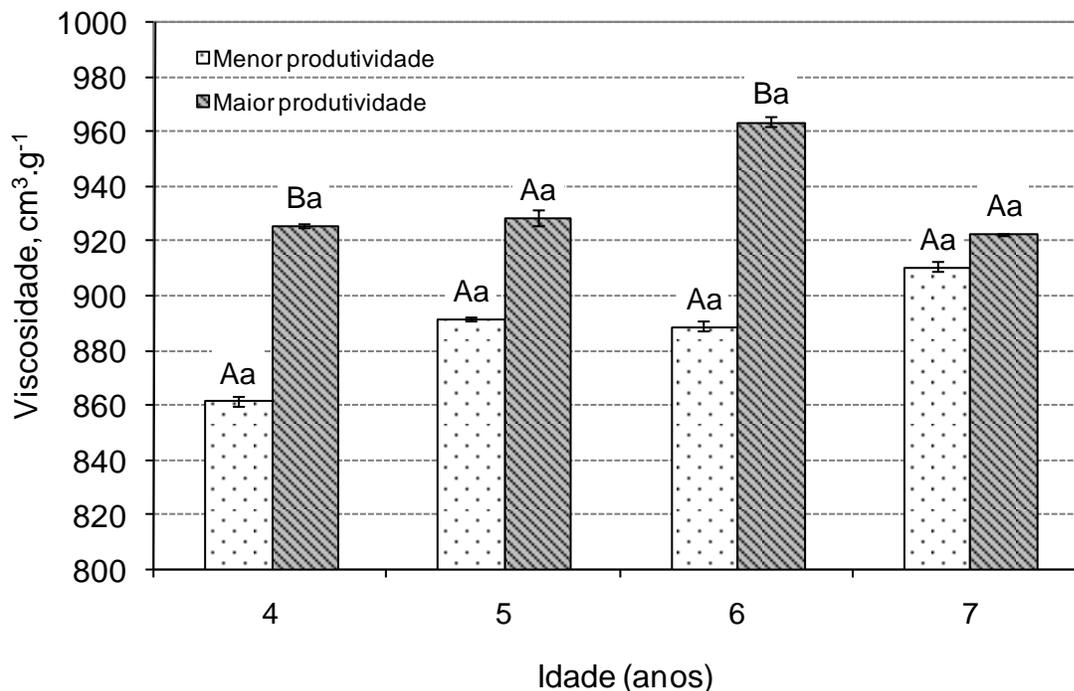


Figura 9 – Viscosidade das polpas marrons

Pelo teste de Tukey ( $P > 0,01$ ), as médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem nas mesmas idades em diferentes sítios e, letras minúsculas iguais não diferem nas diferentes idades nos mesmos sítios.

As viscosidades mais elevadas foram alcançadas nas polpas com materiais provenientes das regiões de maiores produtividades e, tal fato está relacionado à aplicação das menores cargas de álcali, o que evidencia a influência da densidade básica e do teor de extrativos da madeira na qualidade da polpa. Outra observação importante é que nos materiais provenientes de baixas produtividades, a menor viscosidade foi encontrada nas polpas provenientes do material com 4 anos de idade e não com 7 anos.

Com base no rendimento depurado obtido no processo de polpação e na densidade básica da madeira de cada amostra, calculou-se o consumo específico de madeira (Figura 10).

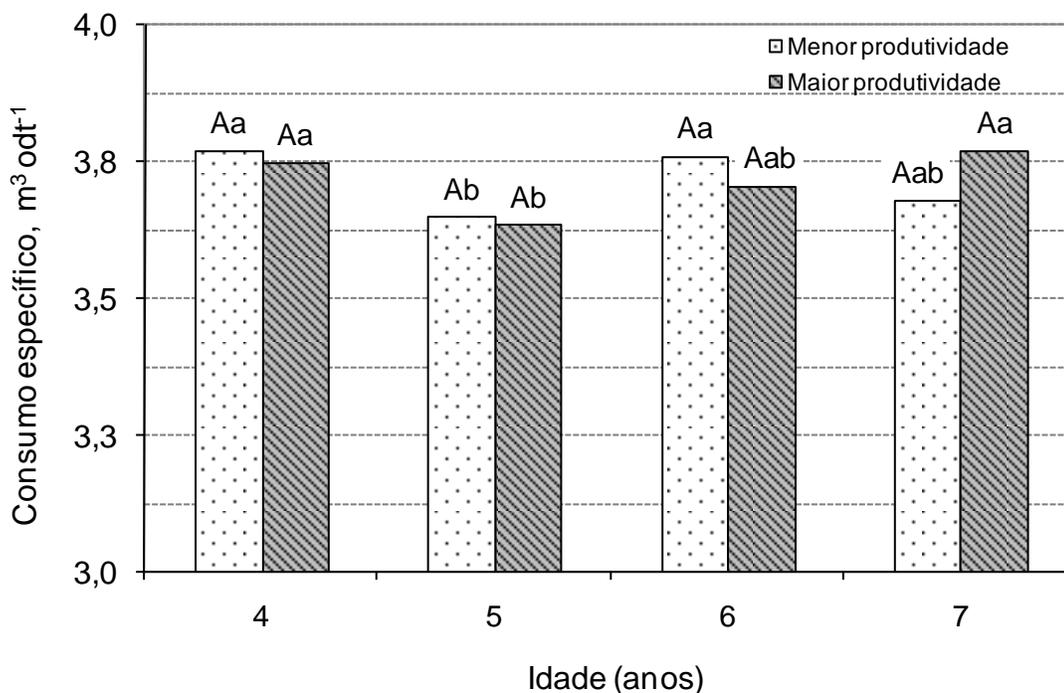


Figura 10 – Consumo específico de madeira

Pelo teste de Tukey ( $P > 0,01$ ), as médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem nas mesmas idades em diferentes sítios e, letras minúsculas iguais não diferem nas diferentes idades nos mesmos sítios.

O consumo específico de madeira é um importante parâmetro no processo de polpação. Quanto mais densa a madeira, menor será o volume necessário de madeira para produzir uma tonelada de polpa. Essa vantagem em projetos novos onde o ciclo de recuperação é dimensionado para cargas de sólidos totais no licor residual, deve ser considerada nos programas de melhoramento florestal (MOLFIENSKI, 2003).

A madeira com idade de 7 anos foi a que apresentou maior densidade básica, mas por outro lado, foi a que apresentou menor rendimento depurado devido a necessidade de uma maior carga alcalina para obter o  $kappa\ 18 \pm 0,5$ . Isso traz como consequência alta quantidade de sólidos gerados por tonelada de celulose produzida, o que pode se tornar um problema dependendo da eficiência da caldeira de recuperação.

Um dos parâmetros bastante utilizados pelas fábricas de celulose para avaliação de custos é o Incremento Médio Anual de Celulose – IMACEL, que é determinado pela quantidade de celulose que pode ser produzida com base na produtividade da floresta, calculada através do Incremento Médio Anual - IMA.

A produção de celulose por hectare acompanha a produtividade florestal, sendo maior nas áreas com solos argilosos quando comparadas as áreas com solos arenosos (Figura 11). Observa-se que as maiores idades das árvores plantadas em solos arenosos foram as que obtiveram menor quantidade de polpa produzida, o que demonstra que nem sempre é a idade que deve determinar a época de utilização da madeira.

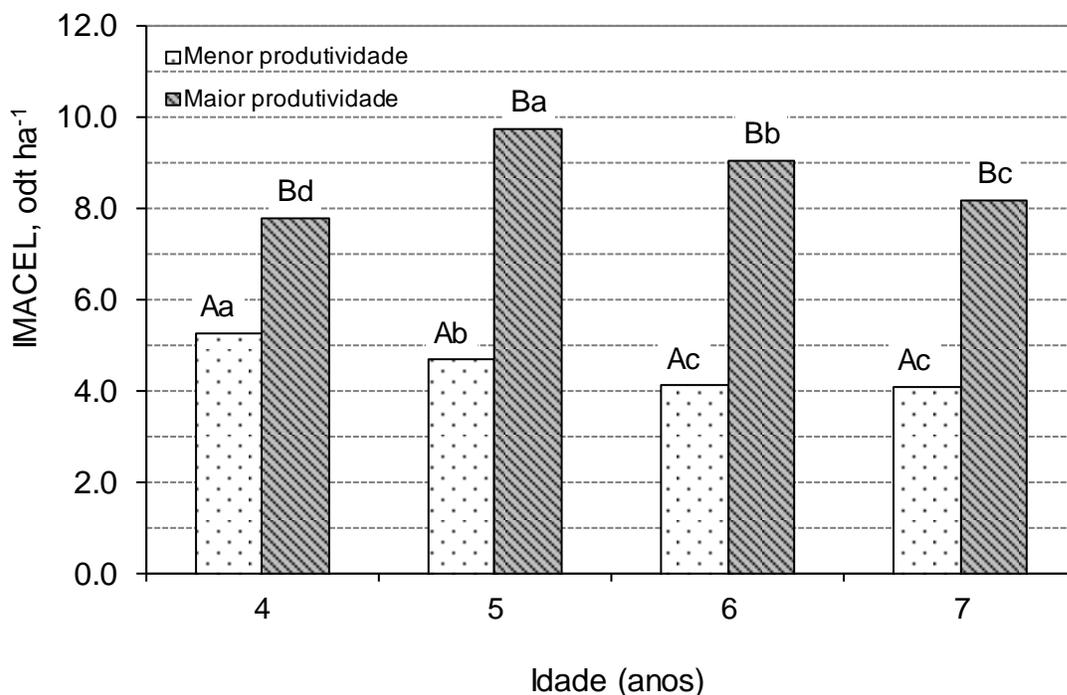


Figura 11 – Incremento Médio Anual de Celulose

Pelo teste de Tukey ( $P > 0,01$ ), as médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem nas mesmas idades em diferentes sítios e, letras minúsculas iguais não diferem nas diferentes idades nos mesmos sítios.

Segundo Molkfienski (2004), os programas de melhoramento florestal devem ser norteados pelo seu incremento médio anual de celulose por hectare ano<sup>-1</sup> (IMACEL), que resultaria em menor consumo de madeira e menor custo variável de fabricação da polpa. Além disso, a produtividade florestal, definido pelo incremento médio anual (IMA), deve ser norteada não somente pelas características físicas da madeira (densidade básica, retidão do fuste, ausência de nós, etc.), como também pelo teor de carboidratos totais.

Evitar condições drásticas de polpação é fundamental para preservação dos carboidratos. A aplicação de levadas cargas alcalinas, além de degradarem e dissolverem a lignina também destroem uma fração dos carboidratos, resultando em menor rendimento e maior quantidade de sólidos dissolvidos no licor negro, conforme pode ser observado para material com 7 anos (Figura 12).

A quantidade de sólidos no licor negro gerados no cozimento por tonelada de polpa produzida é um parâmetro importante para a avaliação do potencial de uma determinada madeira para produção de celulose, visto que um dos fatores limitantes de produção de muitas fábricas no Brasil tem sido a capacidade de queima de sólidos nas caldeiras de recuperação.

As madeiras provenientes de florestas com elevadas produtividades e com 4 e 5 anos de idades foram aquelas que apresentaram menor teor de sólidos gerados (Figura 12) e também maior rendimento depurado, o que pode significar uma redução de custos de produção de celulose, visto que a madeira é uma dos principais itens de custo das polpas celulósicas.

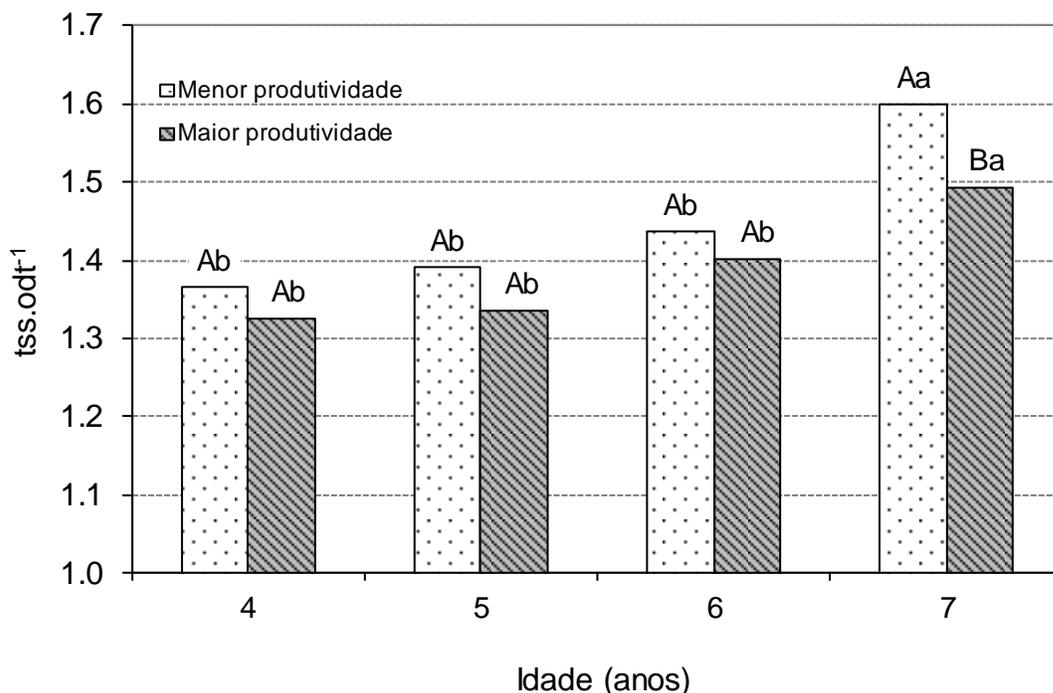


Figura 12- Teor de sólidos secos gerados por tonelada de celulose (tss odt<sup>-1</sup>)

Pelo teste de Tukey ( $P > 0,01$ ), as médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem nas mesmas idades em diferentes sítios e, letras minúsculas iguais não diferem nas diferentes idades nos mesmos sítios.

Gomes (1998) alerta que devido à correlação existente entre densidade básica da madeira e relação sólido/polpa (sólidos totais gerados para a caldeira de recuperação por tonelada de polpa produzida), a madeira pode limitar a capacidade produtiva de uma indústria de celulose basicamente por dois pontos: caldeira e digestor.

Além da lignina residual presente na polpa marrom, há também os chamados ácidos hexenurônicos, que são formados durante o processo de polpação Kraft, a partir da conversão dos ácidos 4-O-metil-glicurônicos presentes nas xilanas, principais hemiceluloses presentes em madeiras de folhosas (ALMEIDA, 2003).

Pelo fato das folhosas possuírem maior quantidade de xilanas, as polpas provenientes de madeiras de eucalipto têm maior quantidade de ácidos hexenurônicos que as polpas provenientes de Pinus, por exemplo. Segundo Bassa (2006), tal condição é desfavorável, pois os ácidos hexenurônicos formam ligações covalentes com a

lignina, consomem reagentes químicos de branqueamento (cloro, dióxido de cloro, ozônio e peróxidos), ligam-se a íons metálicos e causam reversão de alvura de polpas branqueadas.

A quantidade de ácidos hexenurônicos encontrada não se correlaciona com as cargas de álcali utilizadas no cozimento (Figura 13), o que indica que elas são devidas, provavelmente, a diferenças nos conteúdos de ácidos 4-O-metil-glicourônicos das madeiras. Tipicamente as polpas kraft de eucalipto têm valores de 40-60 mmol/kg (COLODETTE et al., 2001; COSTA; COLODETTE, 2002; GOMIDE et al., 2000).

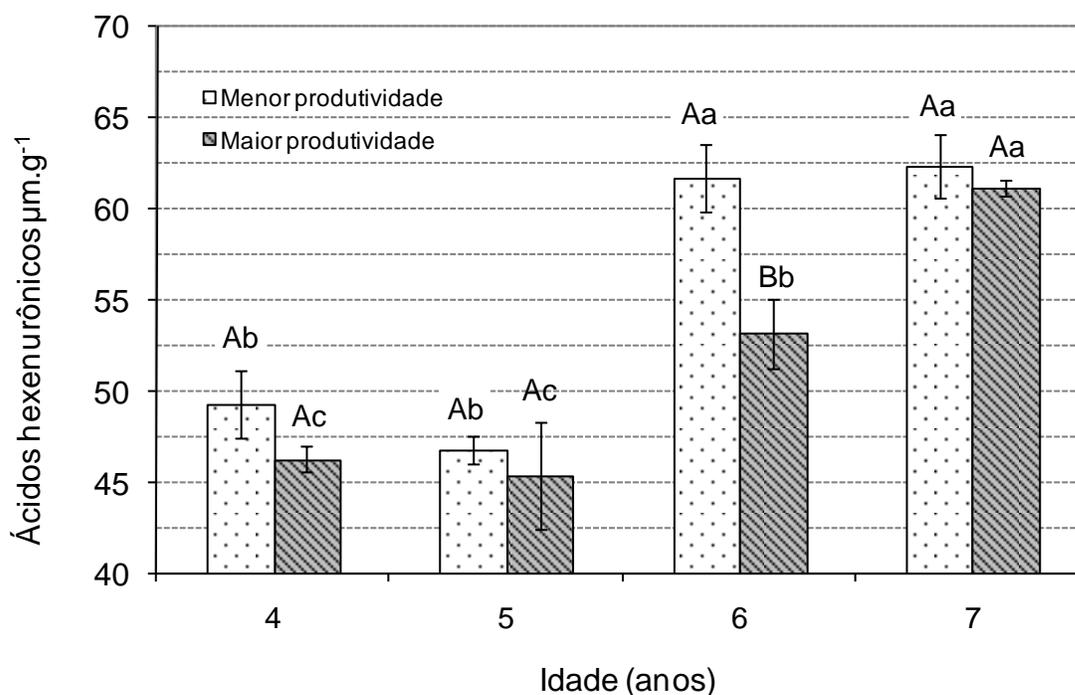


Figura 13- Ácidos hexenurônicos na polpa marrom

Pelo teste de Tukey ( $P > 0,01$ ), as médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem nas mesmas idades em diferentes sítios e, letras minúsculas iguais não diferem nas diferentes idades nos mesmos sítios.

Ventorim (2004) destaca que embora tenham sido sugeridas várias formas de eliminar os ácidos hexenurônicos, um simples estágio de dioxidação possui grande capacidade de mover esses ácidos.

De maneira geral, verifica-se que os parâmetros da polpação, principalmente a carga de álcali, rendimento depurado e viscosidade, foram fortemente influenciados pela taxa de produtividade da floresta e idade das árvores.

### 2.3.6 Licor negro

No final dos cozimentos foram realizadas análises de pH, teor de sólidos totais e álcali ativo residual no licor negro (Tabela 13), com o objetivo de obter mais informações sobre o processo de polpação.

Normalmente, procura-se manter a concentração de álcali ativo residual dos licores na faixa de 5 a 12 gL<sup>-1</sup>, e o pH acima de 12,5 para evitar re-precipitação da lignina nas polpas, o que causaria aumento do número kappa, e consequentemente maior consumo de reagentes no branqueamento.

Tabela 13 - Parâmetros analisados no licor negro

<b>Idade (Anos)</b>	<b>Produtividade</b>	<b>pH do licor</b>	<b>Sólidos Totais, %</b>	<b>Álcali Ativo Residual, g L<sup>-1</sup></b>
4	Baixa	12,97	16,22	13,73
4	Alta	12,95	15,85	12,76
5	Baixa	12,97	16,78	13,72
5	Alta	12,92	16,34	13,36
6	Baixa	12,83	18,98	11,97
6	Alta	12,82	16,21	11,98
7	Baixa	12,93	18,42	16,45
7	Alta	12,95	16,59	14,23

Os valores de álcali ativo residual podem ser considerados altos, em média 13 g L<sup>-1</sup> o que é um indicativo de que o processo de polpação pode ser aperfeiçoado; uma alternativa seria diminuir a carga de álcali aplicada e aumentar o fator H para manter o mesmo nível de deslignificação.

Os maiores resultados, tanto para teor de sólidos totais como para álcali ativo residual, foram encontrados nas madeiras de maior densidade básica, que são aquelas provenientes de áreas com menores produtividades florestais.

### 2.3.7 Branqueamento

Neste trabalho a etapa de branqueamento teve por objetivo principal a obtenção de polpa branqueada para avaliação das características físico-mecânicas, mas ainda assim algumas informações importantes foram obtidas no que diz respeito aos parâmetros do branqueamento e qualidade da madeira.

Os resultados obtidos na etapa de branqueamento mostram que a eficiência da pré-designificação com oxigênio foi maior para as polpas provenientes das áreas mais produtivas em comparação com as áreas de menor crescimento, médias de 50 e 45% respectivamente. Quanto a idade, as amostras com 7 anos apresentaram os melhores resultados para ambas as áreas, porém não houve uma tendência clara quanto ao efeito da idade na designificação destes materiais (Figura 14).

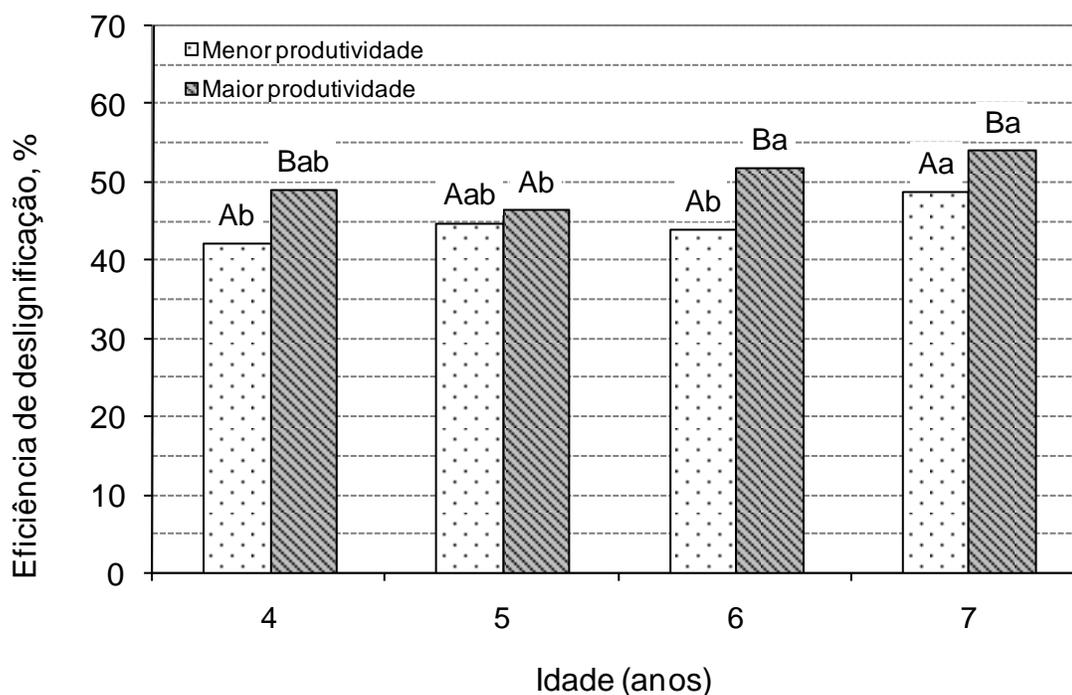


Figura 14 – Eficiência de designificação após pré-O<sub>2</sub>

Pelo teste de Tukey ( $P > 0,01$ ), as médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem nas mesmas idades em diferentes sítios e, letras minúsculas iguais não diferem nas diferentes idades nos mesmos sítios.

Como consequência da maior eficiência da deslignificação com oxigênio, as amostras provenientes de solos argilosos apresentaram menor kappa, com média de 9,20, enquanto que para os solos arenosos a média foi de 10,20 (Figura 15); a idade de 7 anos apresentou os melhores resultados para número kappa após deslignificação com oxigênio (9,54 para solos arenosos e 8,57 para os argilosos).

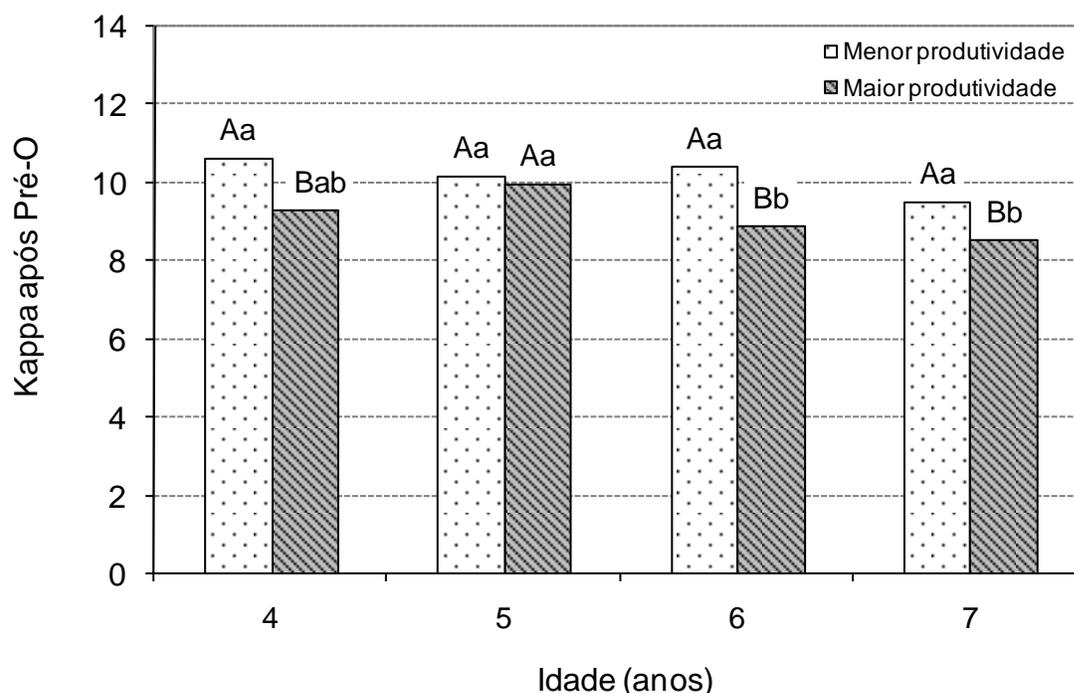


Figura 15 – Kappa após pré deslignificação com oxigênio

Pelo teste de Tukey ( $P > 0,01$ ), as médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem nas mesmas idades em diferentes sítios e, letras minúsculas iguais não diferem nas diferentes idades nos mesmos sítios.

Como a viscosidade da polpa está relacionada com a integridade do grau de polimerização dos carboidratos, os resultados obtidos estão altamente relacionados com a carga de álcali aplicada nos cozimentos, tanto para as viscosidades após pré deslignificação com oxigênio quanto às viscosidades finais. Sendo assim, as maiores viscosidades foram encontradas para amostras provenientes das áreas mais produtivas (Figuras 16 e 17). Já a idade não apresentou comportamento definido.

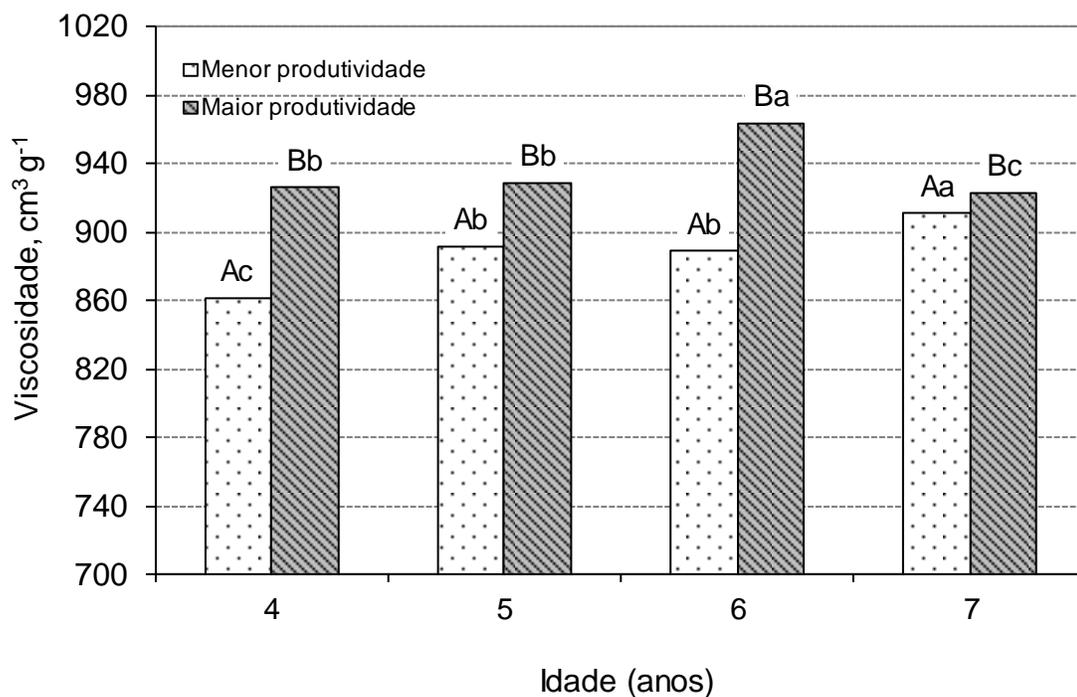


Figura 16 – Viscosidade após pré deslignificação com  $\text{O}_2$

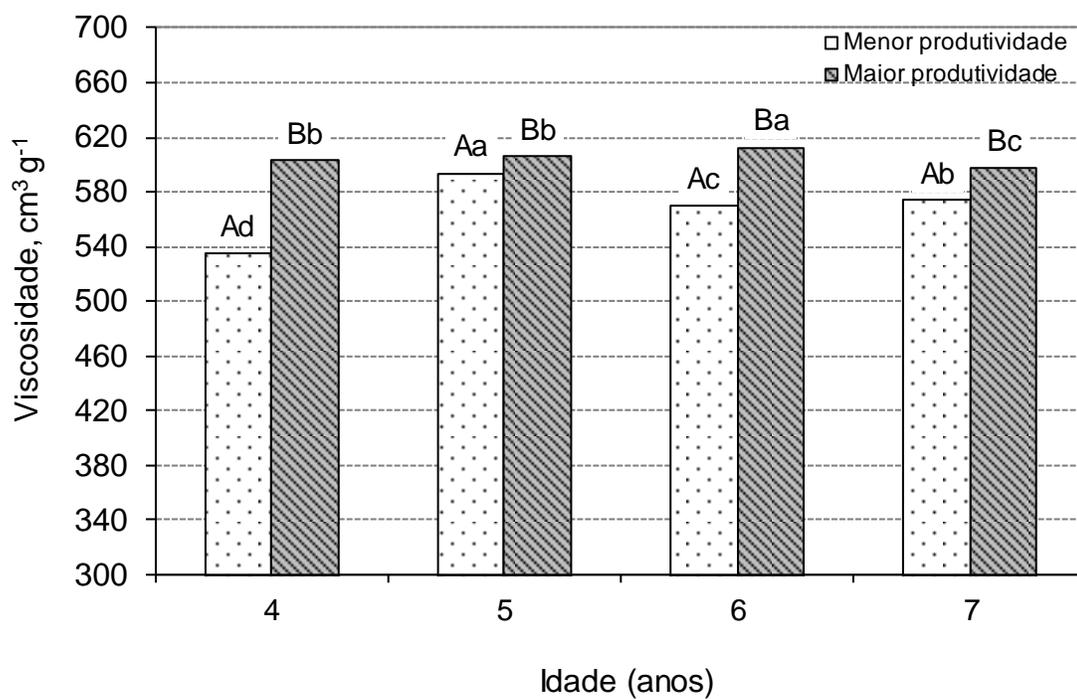


Figura 17 – Viscosidade final das polpas branqueadas

As viscosidades finais encontradas nesses estudos são consideradas muito baixas. Ferreira et al. (2006) avaliaram a qualidade das madeiras de 12 clones do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e todos apresentaram viscosidade final superior a  $700 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ .

Segundo Silva Júnior (1997) a dificuldade de deslignificação da madeira causa um efeito negativo na polpa branqueada, isto é, a medida que utiliza-se madeira de mais difícil deslignificação haverá como consequência polpas branqueadas com menores viscosidades, embora tal fato não necessariamente reflita nas resistências físico-mecânicas das polpas.

As alvuras após pré-O<sub>2</sub> e finais não apresentaram diferenças tanto para idade quanto para produtividade (Figura 18 e 19).

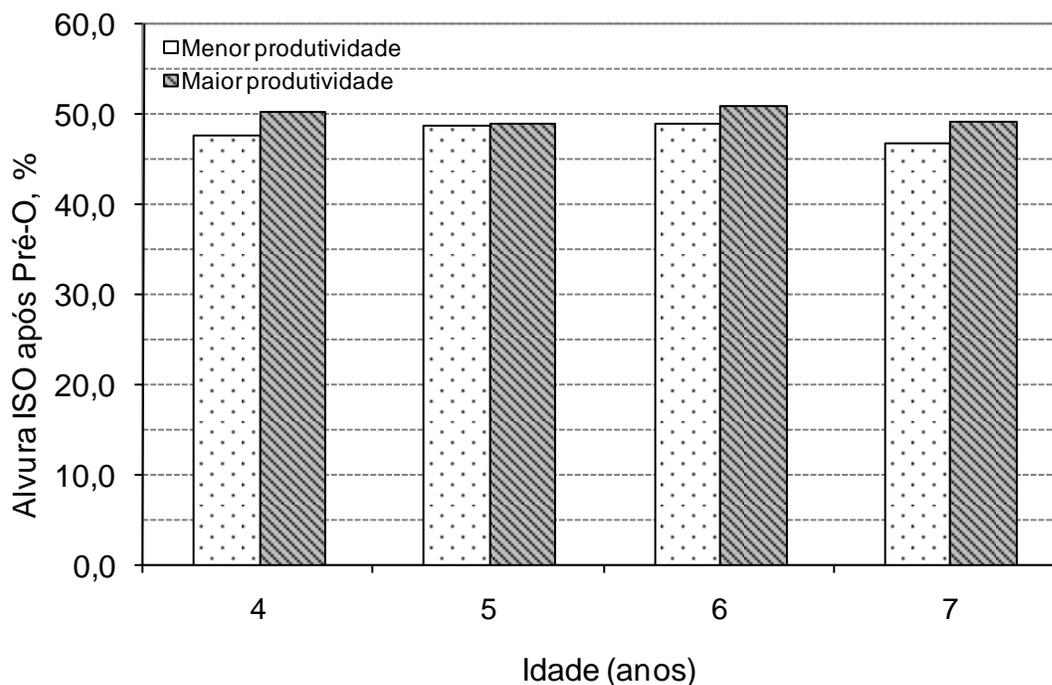


Figura 18 – Alvura após pré deslignificação com O<sub>2</sub>

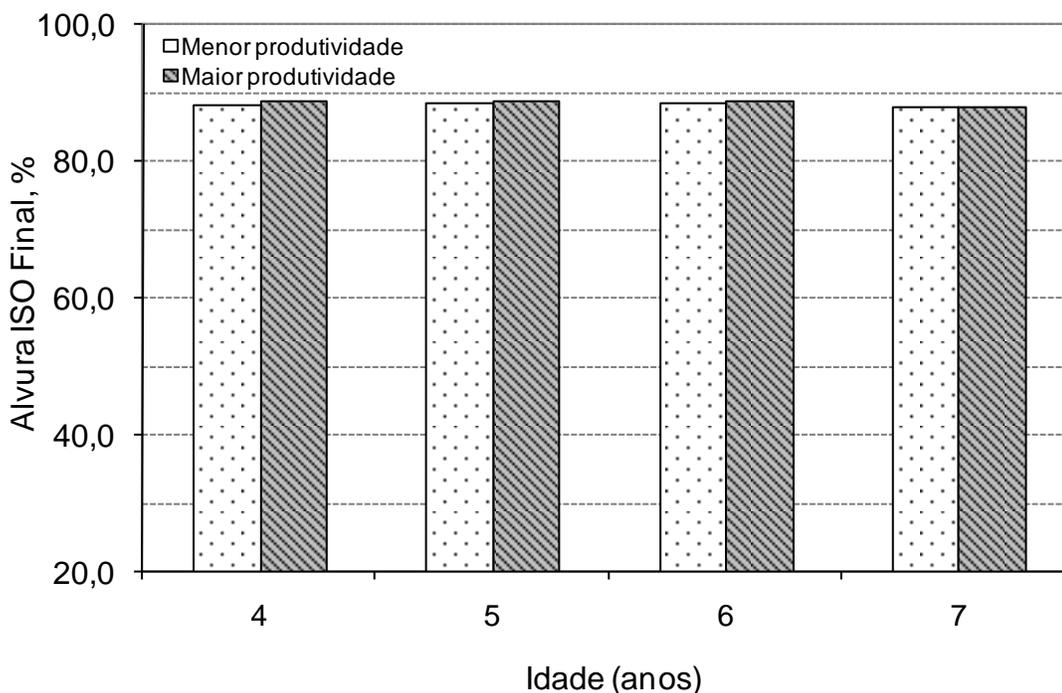


Figura 19 – Alvura final das polpas branqueadas

### 2.3.8 Propriedades físico-mecânicas das polpas celulósica branqueadas

As polpas celulósicas branqueadas foram refinadas e em seguida analisadas as propriedades físico-mecânicas em função da drenabilidade constante igual a 35°SR. O grau Schopper Riegler foi escolhido por ser o parâmetro mais usual para controlar o nível de refino.

O índice de tração é uma das propriedades de maior importância quando se deseja produzir papéis de impressão e escrita, pois indicam a probabilidade de ruptura quando são sujeitos à tensão exercida durante o processo de impressão.

As madeiras de maior produtividade, que por sua vez foram aquelas que apresentaram menores densidades, obtiveram maiores resultados de índice de tração, o que pode ser justificado pelo maior potencial para colapsamento das fibras, o que é alcançado durante o processo de refinação e formação do papel. No entanto, o índice

de tração não aumentou com a idade. Os resultados para índice de tração encontram-se na figura 20.

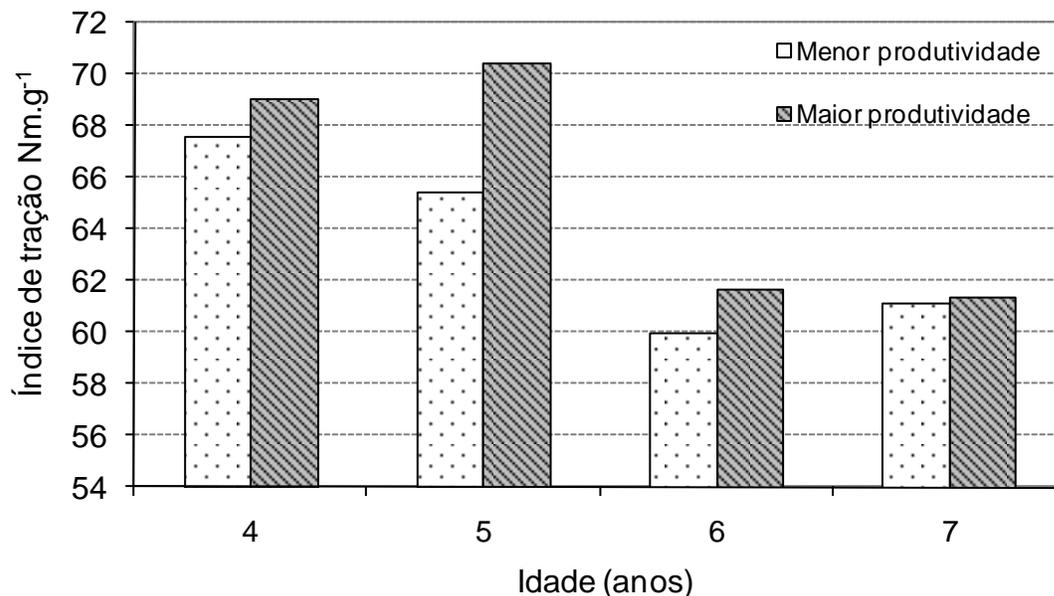


Figura 20 – Índice de tração das polpas branqueadas em função do grau de drenabilidade 35°SR

O índice de rasgo é influenciado, principalmente pelo comprimento e espessura de parede das fibras, é um indicativo da habilidade de resistência das ligações interfibras. Portanto, madeiras mais velhas deveriam produzir maiores resistência ao rasgo, o que não foi evidenciado nesse trabalho (Figura 21).

Pode-se observar que ao contrário do índice de tração, as polpas provenientes de madeiras de elevadas produtividades foram menos resistentes ao rasgo, provavelmente devido a menor densidade básica desses materiais.

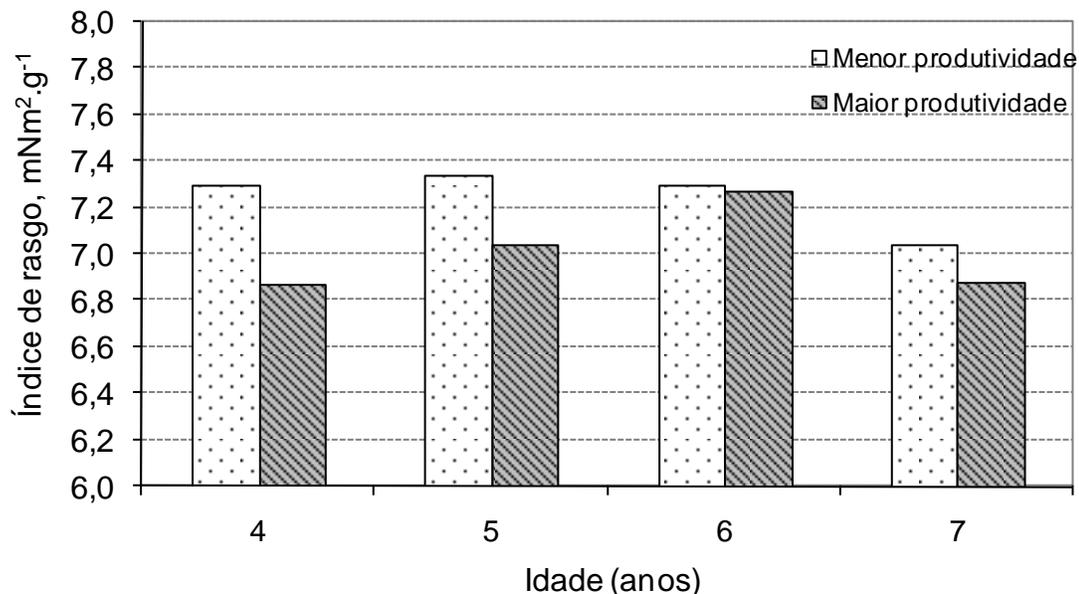


Figura 21 – Índice de rasgo das polpas branqueadas em função do grau de drenabilidade 35°SR

Segundo Bassa (2006) a resistência ao rasgo é uma importante propriedade de polpas celulósicas destinadas à produção de papel, pois está inversamente relacionada ao número de quebras de folhas de máquinas de papel e conseqüentemente a eficiência desta.

Outra propriedade bastante valorizada pelos fabricantes de papel é o volume específico (“bulk”), que está relacionado à capacidade de um determinado papel mostrar maior ou menor volume a uma determinada gramatura. Esta é uma propriedade importante para papéis tissue, pois permitem um elevado volume para um mesmo peso.

Assim como o índice de rasgo as madeiras provenientes de áreas com menores produtividades foram aquelas que apresentaram maior volume específico, possivelmente pela mesma razão, maior densidade básica. Já o fator idade não apresentou relação definida (Figura 22).

Segundo Silva Júnior et al. (1997), fibras com fração parede elevadas tendem a dar origem a papéis com volume específico aparente alto, pois quando estas fibras são comprimidas durante a formação do papel, seu grau de colapso é menor do que das

fibras com frações paredes baixas, que apresentam alto grau de colapso tendendo a formarem fitas.

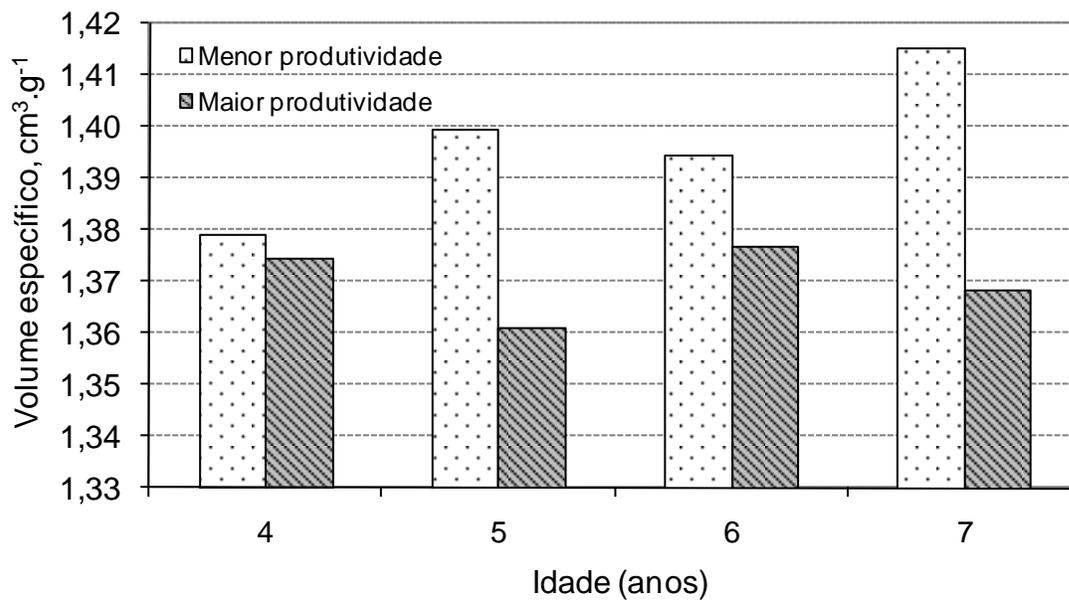


Figura 22 – Volume específico das polpas branqueadas em função do grau de drenabilidade 35°SR

A resistência ao ar representa a dificuldade que um determinado volume de ar encontra para passar através de uma folha de papel, e é dependente do número, tamanho e da forma de distribuição dos poros no material. Esta propriedade está diretamente correlacionada com a capacidade de ligações interfibras que, por sua vez, é função do grau de refino.

As amostras com elevadas produtividades se mostraram mais resistentes a passagem de ar, assim como as amostras com 4 e 5 anos (Figura 23).

De acordo com Demuner et al. (1991) existem evidências de que madeiras com maiores densidades básicas têm fibras menos flexíveis, devido aos elevados valores de momento de inércia da secção transversal das fibras, em consequência da espessura de parede. Portanto, a um mesmo nível de refino fibras com tais características são mais resistentes a ação de forças de consolidação durante a formação do papel, com estrutura mais aberta e maior porosidade, o que resulta em menor resistência a passagem de ar.

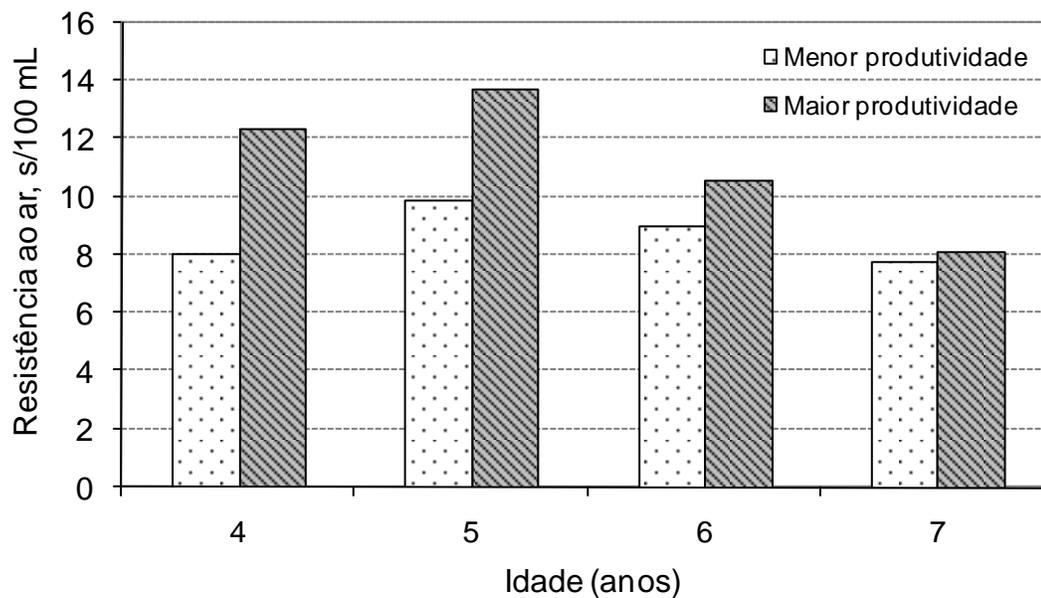


Figura 23 – Resistência ao ar das polpas branqueadas em função do grau de drenabilidade 35°SR

A resistência ao estouro é definida como a pressão necessária para produzir o arrebatamento do material, ao se aplicar uma pressão uniformemente crescente, transmitida por um diafragma elástico com área circular.

As amostras provenientes de áreas com maior produtividades apresentaram maior resistência ao estouro, assim como as madeiras com idades de 4 e 5 anos (Figura 24).

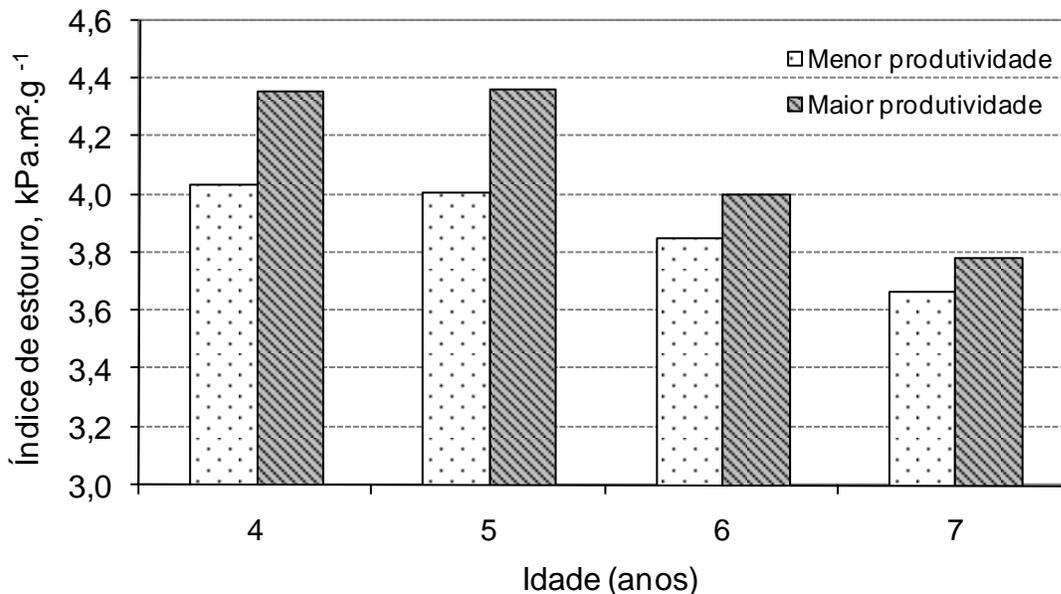


Figura 24 – Índice de estouro das polpas branqueadas em função do grau de drenabilidade 35°SR

A opacidade é uma característica muito importante para papéis de imprimir e escrever; quanto mais opaco for o papel menos transparente ele será, o que permite uma melhor impressão frente e verso. Esta propriedade é fortemente influenciada pela alta população fibrosa das polpas, quanto maior o teor de fibras no papel, mais difícil se torna para os feixes de luz atravessarem; isso porque aumenta a potencialidade de refração e de reflexão da luz no corpo da folha de papel.

As madeiras provenientes de áreas com menores produtividades apresentaram maiores valores de opacidade (Figura 25). Segundo Santos (2005), a opacidade do papel aumenta com um acréscimo de densidade básica da madeira, pois a flexibilidade das fibras é reduzida e a conformidade do papel é reduzida, conseqüentemente a presença de espaços vazios em maior quantidade afeta diretamente o peso específico, porosidade e opacidade.

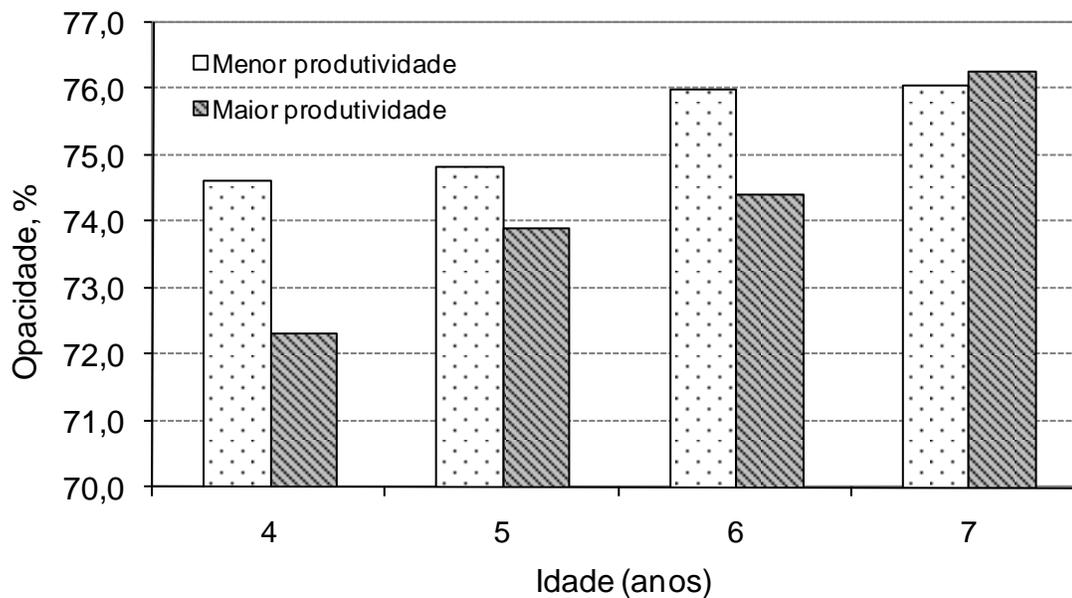


Figura 25 – Opacidade das polpas branqueadas em função do grau de drenabilidade 35°SR

De maneira geral, as propriedades físico-mecânicas analisadas apresentaram melhores resultados para as amostras provenientes das áreas com maiores produtividades e com idades de 4 e 5 anos.



### 3 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho visando à avaliação da influência da produtividade e da idade sobre a qualidade da madeira proveniente de clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* para produção de polpa celulósica braqueada permitem as seguintes conclusões:

- A densidade básica da madeira aumentou com a idade e diminuiu com aumento de produtividade;

- A composição química da madeira não apresentou diferença em função da produtividade florestal. Já para idade verificou-se diferença quanto ao teor de extrativos, mas os teores de lignina e holocelulose não apresentaram diferenças;

- As dimensões das fibras foram influenciadas tanto pela idade quanto pela produtividade, sendo que o comprimento e o diâmetro do lúmen foram maiores para madeiras provenientes de áreas mais produtivas. A espessura de parede aumentou com a idade da árvore;

- A carga alcalina necessária para a obtenção de polpas com número kappa  $18 \pm 0,5$  foi influenciada pela produtividade, e em todas as idades a carga alcalina aplicada foi maior para as madeiras provenientes de áreas menos produtivas. As madeiras com 7 anos de idade apresentaram maior dificuldade de deslignificação independente da produtividade;

- Os maiores rendimentos depurados foram obtidos para madeiras com 4 e 5 anos, sendo o material com 7 anos o de menor desempenho devido alta carga alcalina necessária no cozimento;

- Como consequência da carga de álcali aplicada durante o processo de polpação a viscosidade foi menor para áreas menos produtivas. Já para o fator idade a viscosidade não apresentou padrão definido;

- O consumo específico de madeira não apresentou padrão definido quanto a diferença de produtividade. O Incremento Médio Anual de Celulose – IMACEL apresentou correlação com a produtividade da floresta. A idade não apresentou padrão definido para ambos os parâmetros;

- O teor de sólidos gerados por tonelada de celulose produzida foi maior para as amostras com 7 anos e aquelas provenientes de áreas de baixa produtividade;

- O teor de ácidos hexenurônicos foi maior para madeiras de 6 e 7 anos e em áreas de menor produtividade;

- No branqueamento as amostras provenientes das áreas de maior produtividade apresentaram maior eficiência de deslignificação e maiores viscosidades. Não foram encontrados padrões definidos em nenhum parâmetro do branqueamento com relação às idades;

- De maneira geral, as propriedades físico-mecânicas analisadas apresentaram melhores resultados para as amostras provenientes das áreas com maiores produtividades e com idades de 4 e 5 anos;

Pelos resultados obtidos pode-se concluir que as madeiras provenientes de área com elevada produtividade apresentaram melhor qualidade para produção de polpa celulósica em relação à área de baixa produtividade. E as idades de 4 e 5 anos apresentaram maior desempenho frente ao processo de polpação.

## REFERÊNCIAS

- ALENCAR, G.S.B. **Estudo da qualidade da madeira para produção de celulose relacionada à precocidade na seleção de híbridos *E. grandis* x *E. urophylla***. 2002. 145 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- ALENCAR, G.S.B.; BARRICHELO, L.E.G.; SILVA JUNIOR, F.G. Qualidade da madeira de híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla* e seleção precoce. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 35., 2002, São Paulo, **Anais...** São Paulo: ABTCP, 2002. 1 CD-ROM.
- ALMEIDA, F.S. **Influência da carga alcalina no processo de polpação Lo-Solids® para madeiras de eucalipto**. 2003. 115 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- ASSIS, T.F. Melhoramento genético do eucalipto. **Informações Agropecuárias**, Belo Horizonte, v. 8, n. 185, p. 40-51, 1996.
- BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O. Variabilidade longitudinal e radial da madeira de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 17., 1984, São Paulo, **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1984. p. 403-409.
- BARRICHELO, L.E.G.; FOELKEL, C.E.B. Produção de celulose sulfato a partir de misturas de madeira de *Eucalyptus saligna* com pequenas proporções de cavacos de *Bamboosa vulgaris* var. *vitatta*. **IPEF**, Piracicaba, n. 10, p. 93-99, 1975.
- BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O.; BAZANELLI, A.V. Densidade básica e características das fibras de madeiras de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 3., 1983, São Paulo, **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1983. v. 1.p. 113-125.
- BASSA, A. **Processos de polpação kraft convencional e modificado de madeira de *E. grandis* e híbrido (*E. grandis* x *E. urophylla*)**. 2002. 103 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- BASSA, A.G.M.C. **Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* para produção de celulose kraft através do processo Lo-solids®**. 2006. 169 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

BILLA, E.; PASTOU, A.; MONTIES, B.; ROMERO, J.; KOUKIOS, E.G. Multivariate chemometric analysis of the fluorescence spectra of eucalyptus wood. **Industrial, Crops and Products**, Amsterdam, v. 11, p. 187-196, 2000.

BINKLEY, D.; STAPE, J.L.; RYAN, M.G. Thinking about efficiency of resource use in forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.193, p. 5-16, 2004.

BRACELPA. **Relatório anual 2008/2009**. São Paulo, 2009. 60p.

BRASIL, M.A.A.; FERREIRA, M. Variação de densidade básica da madeira de *E. Alba* Reinw, *E.saligna* Smith, *E.gradis* Hill ex-Maiden aos cinco anos de idade, função do local e do espaçamento. **IPEF**, Piracicaba, n.2/3, p. 129-149, 1971.

CARDOSO, G.S. **Fabricação de celulose**, vol.1, Senai, Curitiba, 2006, 349p.

CARPIM, M.A.; BARRICHELO, L.E.G.; SILVA JUNIOR, C.E.; DIAS, R.L.V. A influência do número de fibras por grama nas propriedades óticas do papel. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 20., 1987, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1987. p. 183-205.

CARVALHO, H.G.; OLIVEIRA, R.C.; GOMIDE, J.L; COLODETTE, J.L. Efeito da idade de corte da madeira e de variáveis de refino nas propriedades da celulose kraft branqueada de eucalipto. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 31., 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1998. 1 CD-ROM.

COLODETTE, J.L.; GOMIDE, J.L.; GLEYSYS, K.; KOGAN, J.; JAASKELAINEN, A.S.; ARGYROPOULOS, D. Yeld and bleachability of hardwood and softwood kraft/Polysulphide pulps. **Pulp and Paper Canada**, Toronto, v. 102, n. 9, p. 269-272, 2001.

COSTA, M.M.; COLODETTE, J.L. Efeito da composição química da polpa kraft-O<sub>2</sub> na sua branqueabilidade. **O Papel**, São Paulo, v. 63, n. 8, p. 93-103, 2002.

COUTO, H.T.Z.; BATISTA, J.L.F.; RODRIGUEZ, L.C.E. **Mensuração e gerenciamento de pequenas florestas**. Piracicaba: IPEF; ESALQ, Depto. Ciências Florestais, 1989. 36 p. (Documentos Florestais, 5).

DEMUNER, B.J.; DORIA, E.L.V.; CLÁUDIO-DA-SILVA JR., E.; MANFREDI, V. As propriedades do papel e as características das fibras de eucalipto. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 24., 1991, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1991. p. 621-640.

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

FERREIRA, C.A.; FREITAS, M.; FERREIRA, M.A. Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* spp, em função da idade e qualidade do local. **Boletim informativo IPEF**, Piracicaba, v. 6, n. 20, p. b1-b19, 1978.

\_\_\_\_\_. Densidade básica da madeira de plantações comerciais de eucaliptos na região de Mogi Guaçu. **IPEF**, Piracicaba, n. 18, p. 106-117, 1979.

FERREIRA, C.R.S.; FANTINI JUNIOR, M.; GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; CARVALHO, A.M.M.L. Avaliação tecnológica de clones de eucalipto. Parte I: Qualidade da madeira para produção de celulose Kraft. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 70, p. 161-170, 2006.

FERREIRA, M.; KAGEYAMA, P.Y. Melhoramento genético da densidade básica da madeira do eucalipto. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 3., 1978, Manaus. **Anais...** São Paulo: SBS, 1978. v. 2, p. 148-152.

FOELKEL, C.E.B. As fibras dos eucaliptos e as qualidades requeridas na celulose kraft para a fabricação de papel. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, ABTCP, 2009. Disponível em: <<http://www.eucalyptus.com.br>>. Acesso em: 18 out. 2010.

FOELKEL, C.E.B.; BARRICHELO, L.E.G.; MANFREDI, V. Análise quantitativa de fibras celulósicas. **O Papel**, São Paulo, v. 37, n. 9, p. 59-64, 1976.

FOELKEL, C.E.B.; BRASIL, M.A.A.; BARRICHELO, L.E.G. Métodos de determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **IPEF**, Piracicaba, n. 213, p. 65-74, 1971.

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

GAVA, J.L.; GONÇALVES, J.L.M. Soil attributes and wood quality for pulp production in plantations of *Eucalyptus grandis* clone. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, n. 3, p. 306-313, May/June 2008.

GESSEL, S.P. Site evaluation in forest production and management. In: REUNION DE TRABAJO: EVALUACION DE LA PRODUCTIVIDAD DE SITIOS FORESTALES, 1982, Valdivia. **Actas...** Valdivia: Facultad de Ciencias Forestales, 1982. p. 326-357.

GOMES, I.M.B.; PEREIRA, A.M.; YODOVAL, P. Mix de madeira: a busca do melhor desempenho global. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 31, 1998, São Paulo. **Anais...**, São Paulo: ABTCP, 1998. p. 19-23.

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

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L. **Qualidade da madeira**: biotecnologia florestal. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2007. 387 p.

- GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; CHAVES, R.O.; SILVA, C.M. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 219, n. 1, p. 129-137, 2005.
- GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C.; GIRAD, R.; ARGYROPOULOS, D. Fatores que afetam a branqueabilidade de polpas kraft de *Eucalyptus*. Parte II: Influência de parâmetros da polpação. **O Papel**, São Paulo, v. 61, n. 12, p. 61-70, 2000.
- GUSTAVSSON, C. **On the interrelation between Kraft cooking conditions and pulp composition**. 2006. 89 p. Thesis (PhD in Wood Chemistry and Pulp Technology) - Royal Institute of Technology, Stockholm, 2006.
- MIGLIORINI, A.J. **Variação da densidade básica da madeira de *E. grandis* em função de diferentes níveis de produtividade da floresta**. 1986. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.
- MIGLIORINI, A.J.; BARRICHELO, L.E.G.; KAGEYAMA, P.Y.; CAMARGO, F.R.A. Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* em função de diferentes níveis de floresta. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 21., 1988, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1988. p. 17-23.
- MILANEZ, A.P.; BARTH, P.P.O.; PINHO, N.C.; VESZ, J.B.V. Influência das hemiceluloses nas propriedades óticas e físico-mecânicas da polpa. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 15., 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1982. p. 155-170.
- MOKFIENSKI, A. **Importância relativa da densidade básica e composição química de madeira de *Eucalyptus* spp. no rendimento, branqueabilidade e qualidade da polpa kraft**. 2004. 152 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.
- MOKFIENSKI, A.; GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C. Importância da densidade e do teor de carboidratos totais da madeira de eucalipto no desempenho da linha de fibra. In: COLÓQUIO INTERNACIONAL SOBRE CELULOSE KRAFT DE EUCALIPTO, 2003, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 2003. p. 15-38.
- MONTHEIT, J.L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions Royal Society of London**. Series B, London, v. 281, p. 277-294, 1977.
- MORA, A.L.; BALLONI, E.A. **Produtividade florestal**. Piracicaba: IPEF; ESALQ, Depto. Ciências Florestais, 1988. 7 p. (Circular Técnica, 164).
- MORAIS, P.H.D. **Efeito da idade da madeira de eucalipto na sua química, polpabilidade, branquiabilidade e propriedades físicas da polpa**. 2008. 65 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

NICHOLS, J.W.P. The effect of environment on wood characteristics. **Silva e Genética**, Frankfurt, v. 20, n. 3, p. 67-73, 1971.

OLIVEIRA, L.L.; FONTINHAS, R.L.; LIMA, A.M.M.; LIMA, R.J.S. Mapas dos parâmetros climatológicos do estado do Pará: umidade, temperatura e insolação, médias anuais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2004. 7p.

OLIVETTI NETO, A. Qualidade de cavacos de eucalipto para obtenção de celulose Kraft. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE INVESTIGACION EM CELULOSA Y PAPEL, 3., 2002, Campinas, Brazil. **Trabalhos...** Campinas: 2002. 1 CD ROM

PENALBER, A.M.C. **Estudos tecnológicos da polpação de *E. grandis*, pelo processo sulfito neutro, com e sem adição de antraquinona.** 1983. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1983.

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

RIGATTO, P.A.; DEDECEK, R.A.; MATOS, J.L.M. Influência dos atributos do solo sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda* para produção de celulose kraft. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 267-273, 2004.

RODRIGUEZ, L.C.E. Um critério de decisão para reforma ou condução de eucaliptais que consideram a distância de transporte. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 11, n. 30, p. 47-50, 1997.

SANTOS, S. R. **Influência da qualidade da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e do processo Kraft de polpação na qualidade da polpa branqueada,** 2005. 172 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT user's guide:** version 6.08. Carrey, 1997. v. 2, 846 p.

SHIMOYAMA, V.R.S.; BARRICHELO, L.E.G. Importância da adubação na qualidade da madeira e celulose. In: SIMPÓSIO SOBRE ADUBAÇÃO E QUALIDADE DE PRODUTOS AGRÍCOLAS, 1., 1989, Ilha Solteira. **Anais...** Ilha Solteira: UNESP, 1989. p. 61-76.

SILVA JUNIOR, F.G. **Conversão do processo kraft em soda DDA (sal disódico de 1,4-dihidro-9,10-dihidroxi antraceno) para madeira de eucalipto.** 1994. 172 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

\_\_\_\_\_. **Polpação kraft do eucalipto com adição de antraquinona, polisulfetos e surfactante.** 1997. 116 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

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

SILVA JUNIOR, F.G.; VALLE, C.F.; MUNER, J.C.G. Programa de qualidade da madeira da Votorantim Celulose e Papel, VCP. **O Papel**, São Paulo, v. 57, n. 1, p. 35-43, jan. 1996.

SMOOK, G.A. **Handbook for pulp & paper technologists.** 3<sup>rd</sup> ed. Vancouver: Angus Wilde Publication, 2002. 425 p.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. *Eucalyptus* production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 17-31, 2004.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; JACOB, W.S.; TAKAHASHI, E.N. A twin-plot approach to determine nutrient limitation and potential productivity in *Eucalyptus* plantations as landscapes scales in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 223, p. 358-362, 2006.

TAPPI. **Test methods.** Atlanta: TAPPI Press, 2006.

TOMAZELLO FILHO, M. **Efeito da irrigação e fertilização nas propriedades do lenho de árvores de *E. grandis* x *E. urophylla*.** 2006. 135 p. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

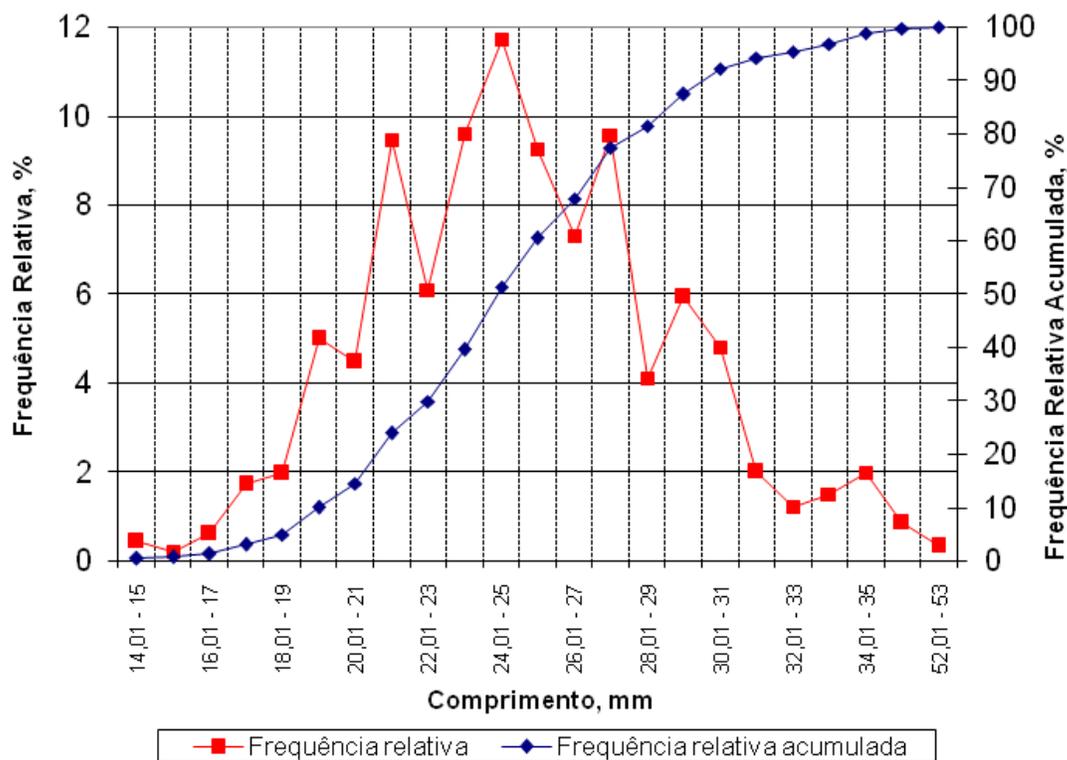
TURGILHO, P.F., LIMA, J.T., MENDES, L.M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas das madeiras de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.

VENTORIM, G. **Estudos das reações da lignina e dos ácidos hexenurônicos em polpa kraft de eucalipto com oxigênio, dióxido de cloro, ácido sulfúrico e ozônio.** 2004. 185 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

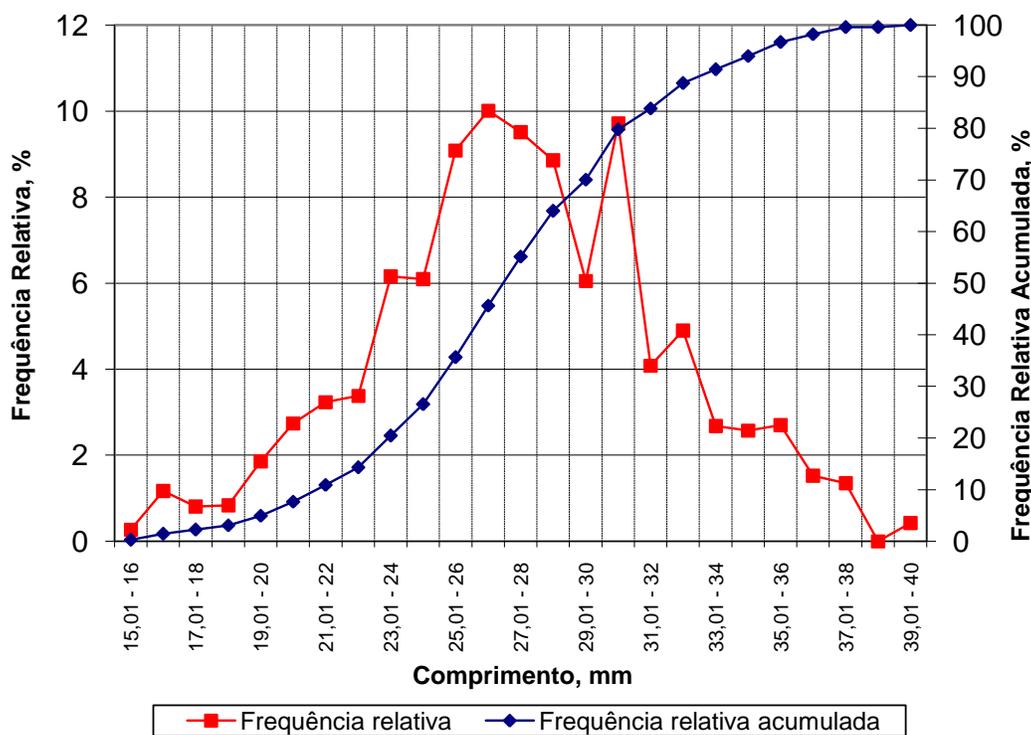
WEHR, T.F.A. **Variações nas características da madeira de *E. grandis* Hill ex- maiden e suas influências na qualidade de cavacos em cozimento kraft.** 1991. 84 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

**ANEXOS**

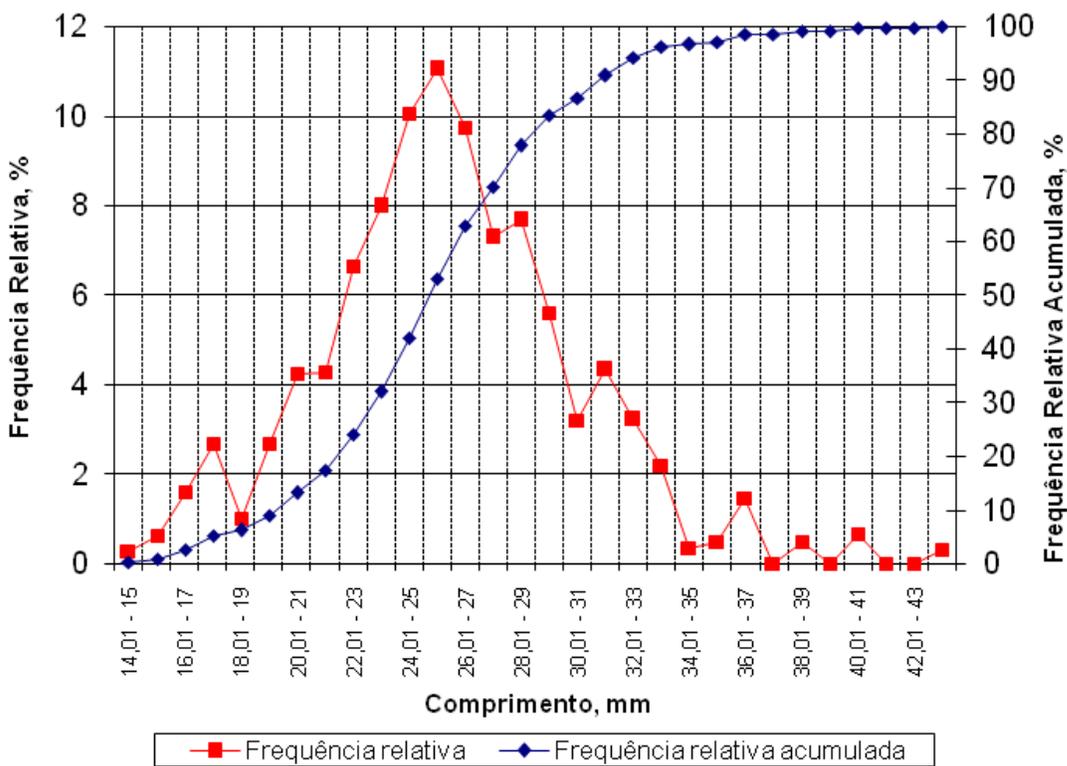




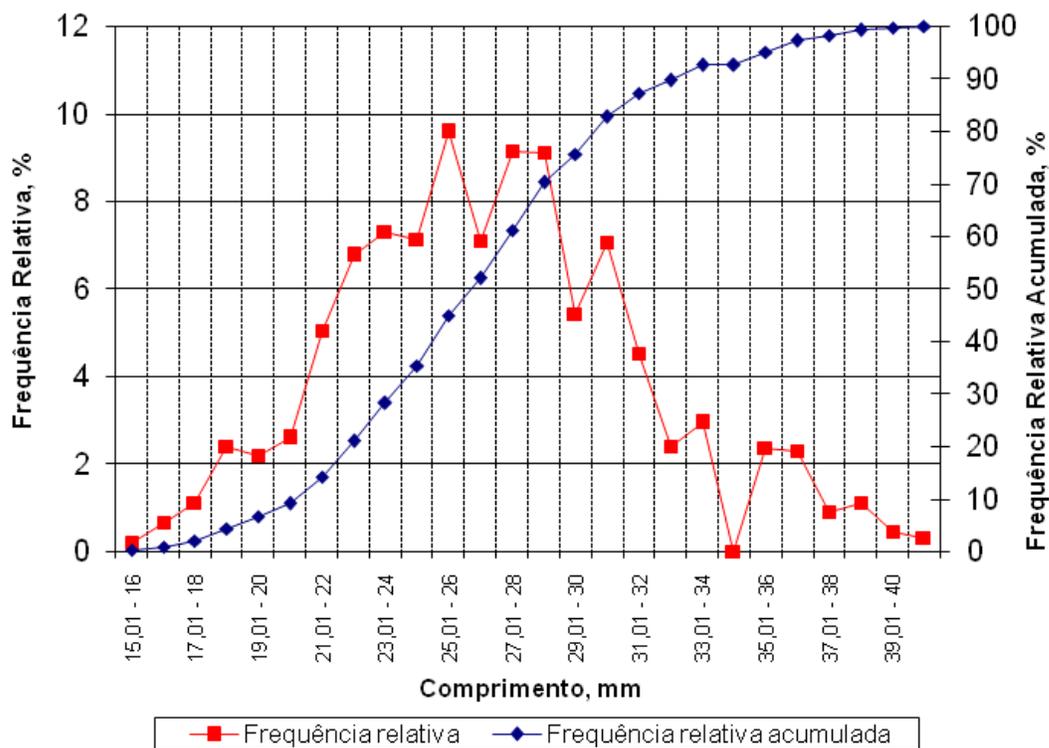
A1 - Distribuição dos cavacos por classe de comprimento, 4 anos e baixa produtividade



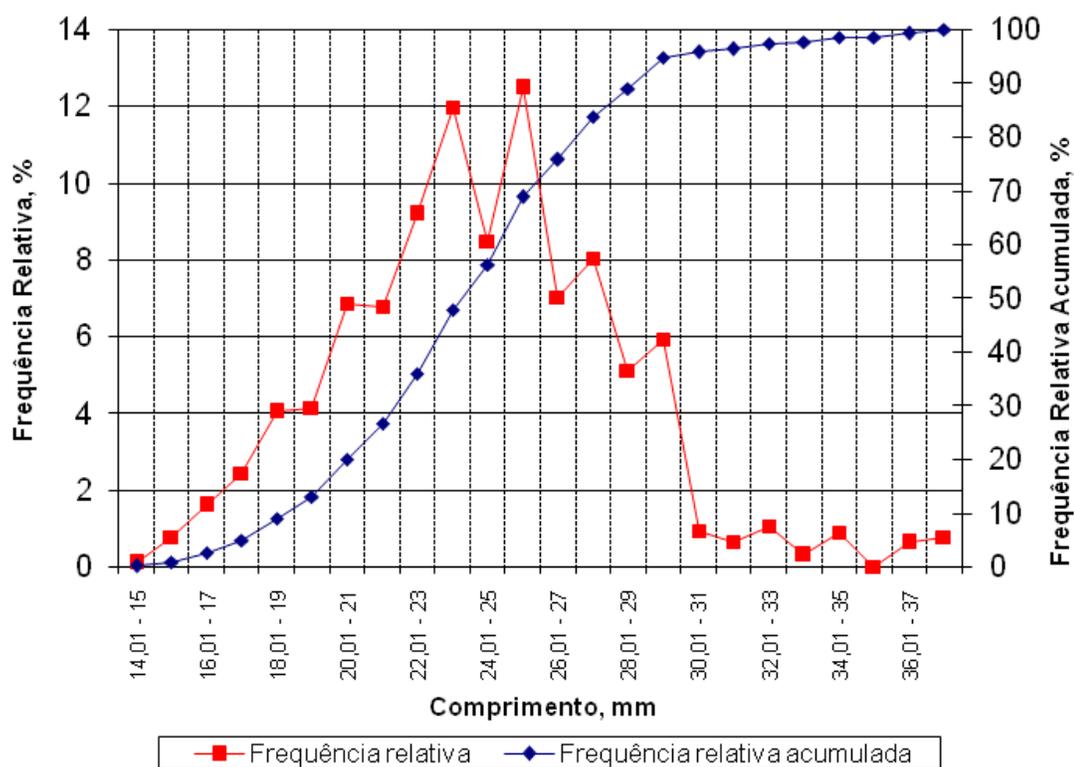
A2 - Distribuição dos cavacos por classe de comprimento, 4 anos e alta produtividade



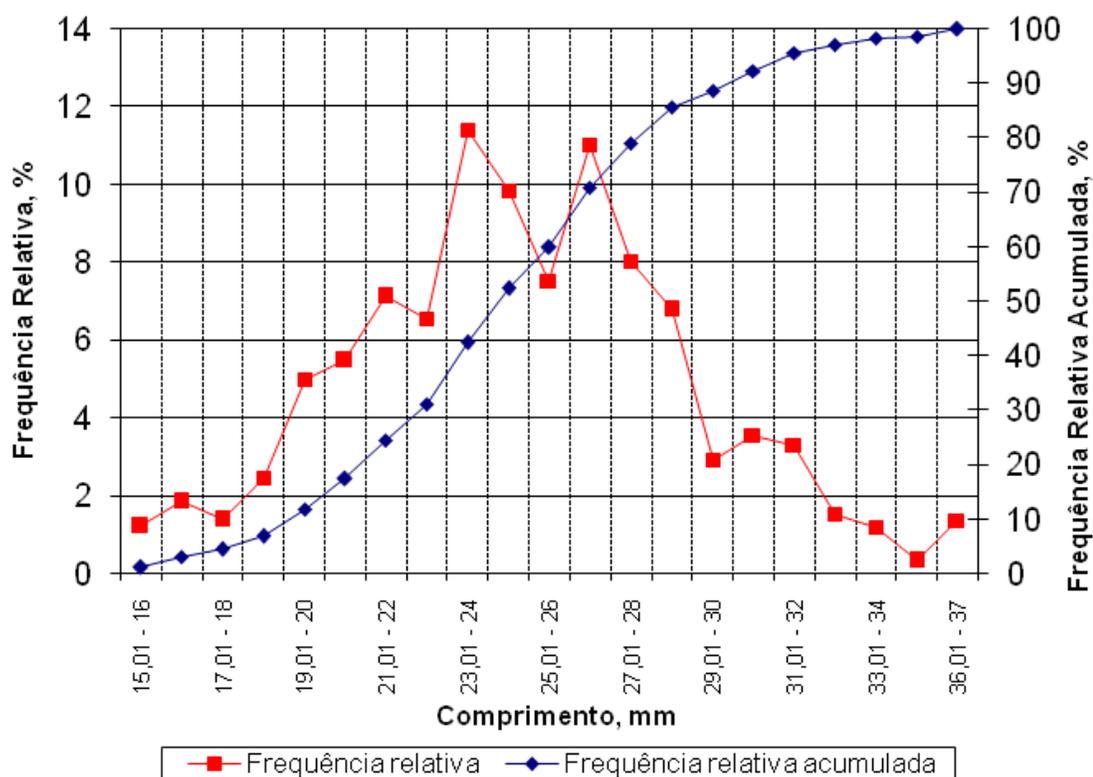
A3 - Distribuição dos cavacos por classe de comprimento, 5 anos e baixa produtividade



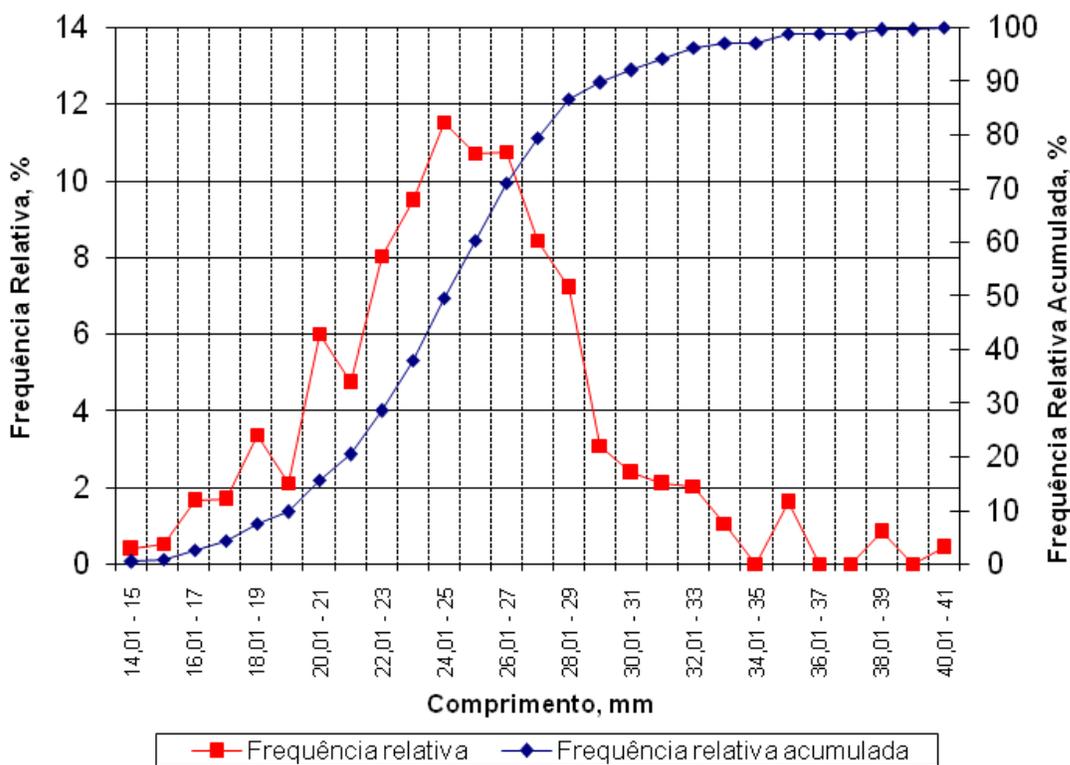
A4 - Distribuição dos cavacos por classe de comprimento, 5 anos e alta produtividade



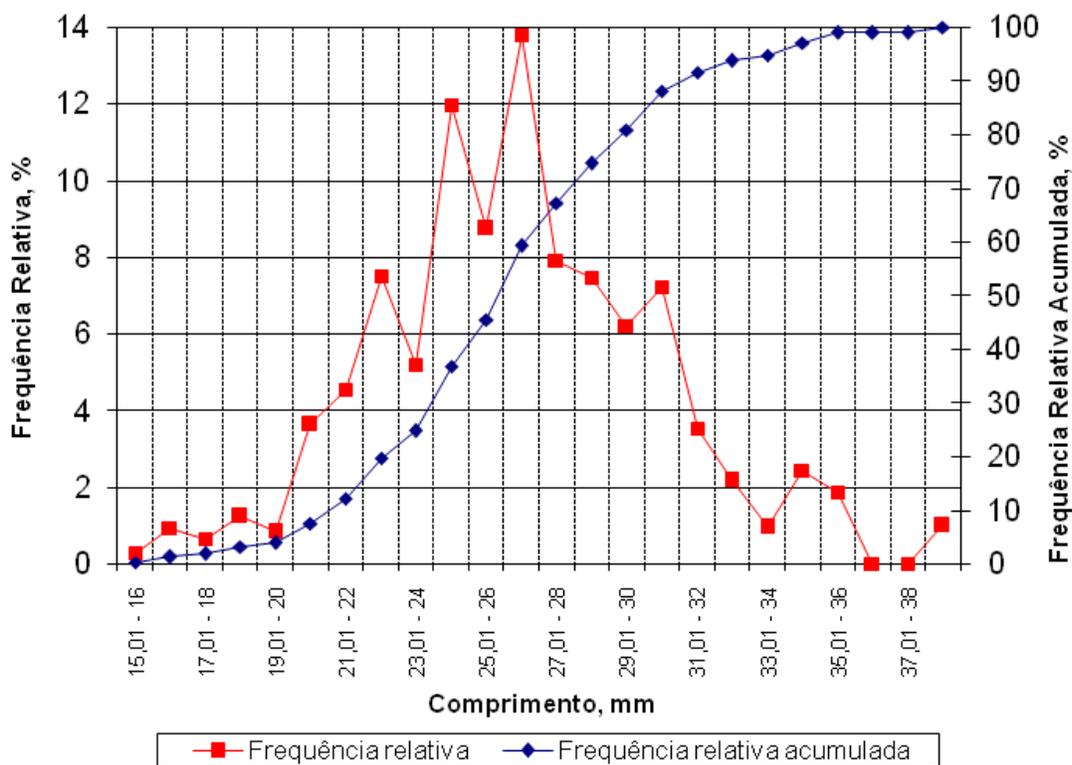
A5 - Distribuição dos cavacos por classe de comprimento, 6 anos e baixa produtividade



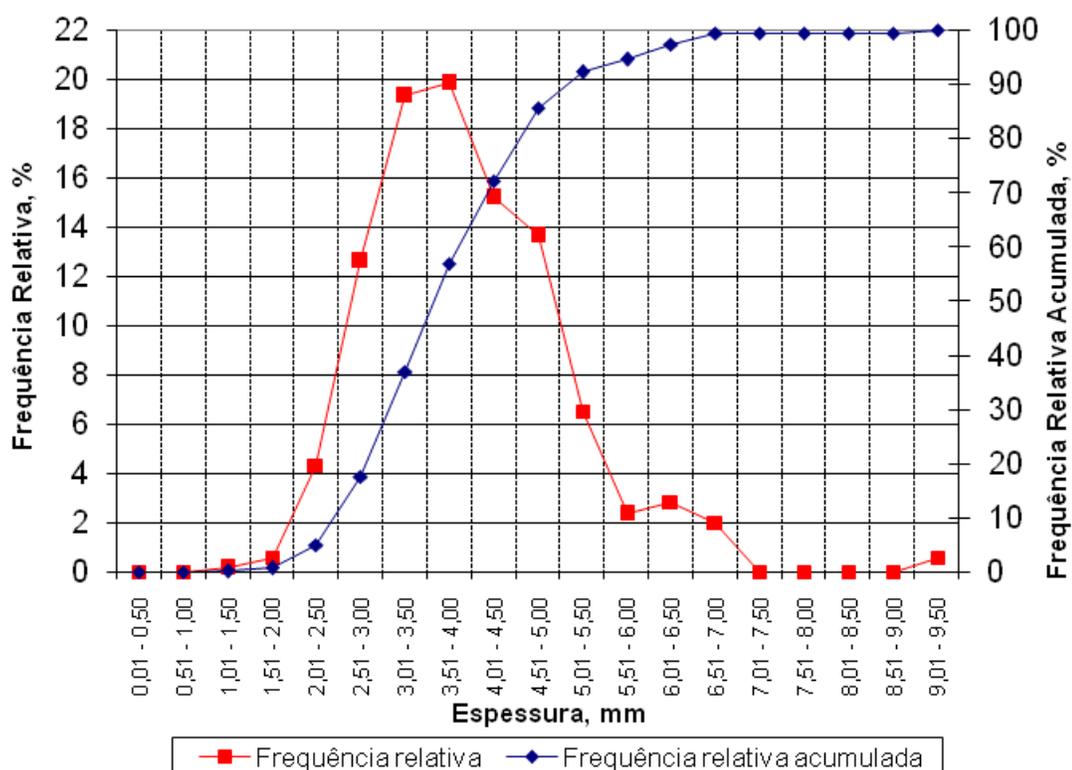
A6 - Distribuição dos cavacos por classe de comprimento, 6 anos e alta produtividade



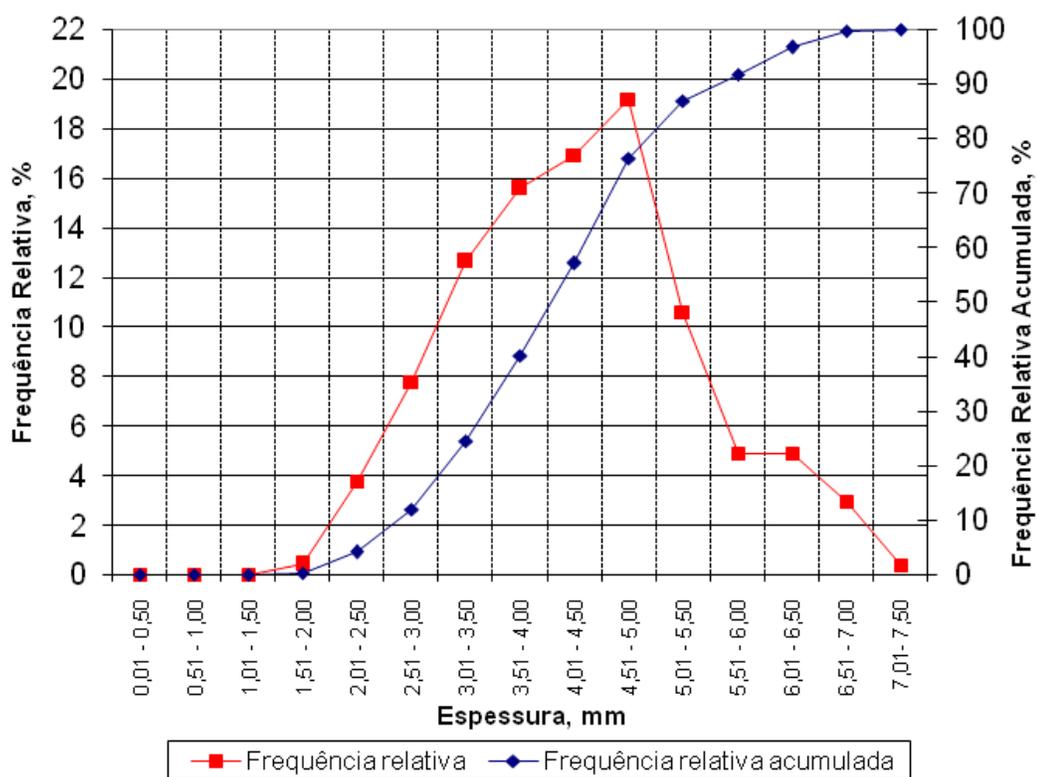
A7 - Distribuição dos cavacos por classe de comprimento, 7 anos e baixa produtividade



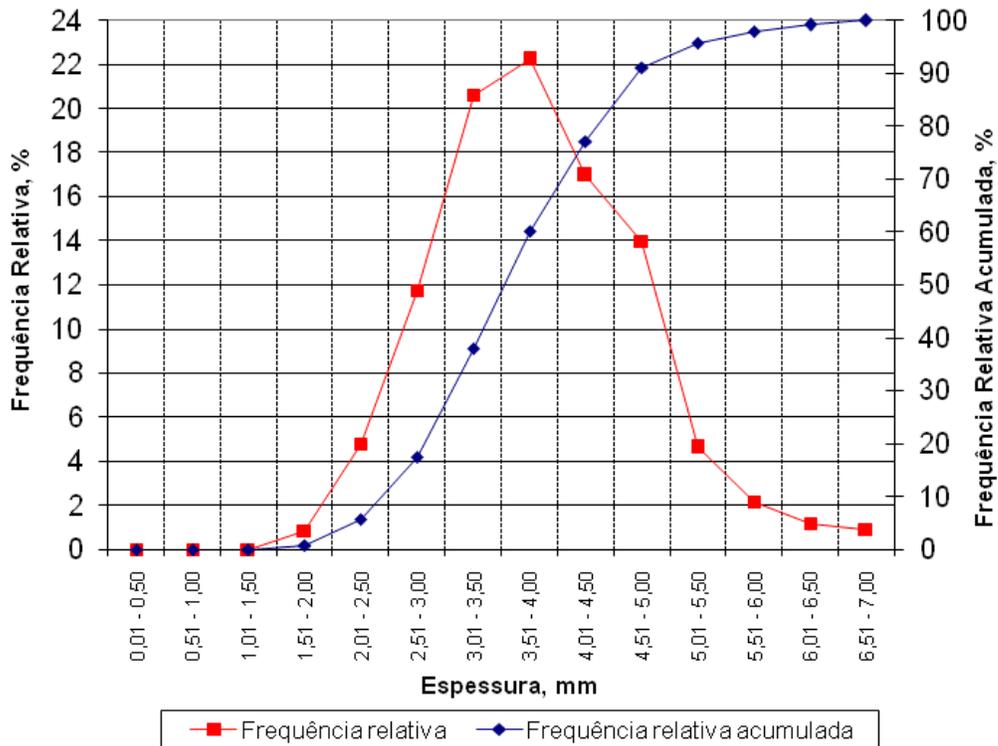
A8 - Distribuição dos cavacos por classe de comprimento, 7 anos e alta produtividade



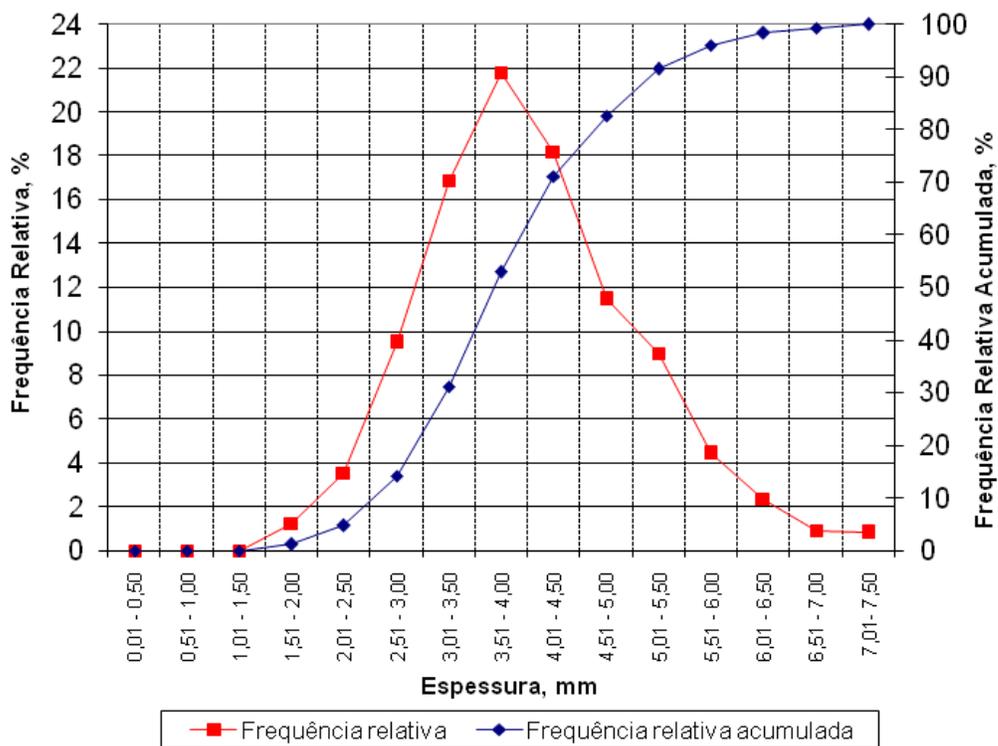
B1 - Distribuição dos cavacos por classe de espessura, 4 anos e baixa produtividade



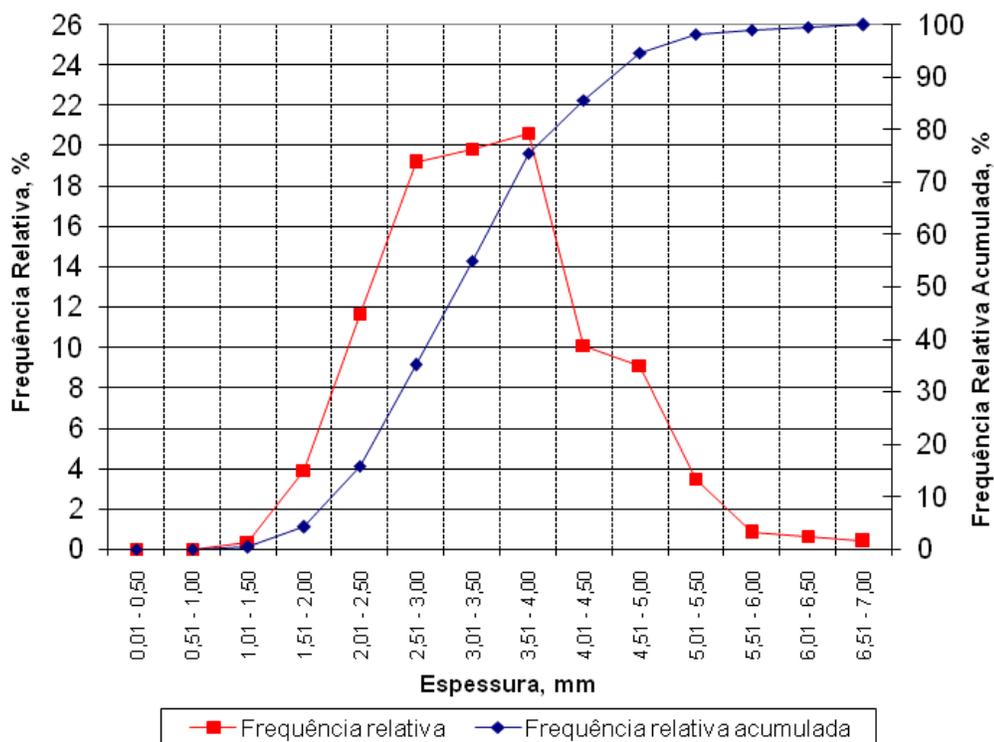
B2 - Distribuição dos cavacos por classe de espessura, 4 anos e alta produtividade



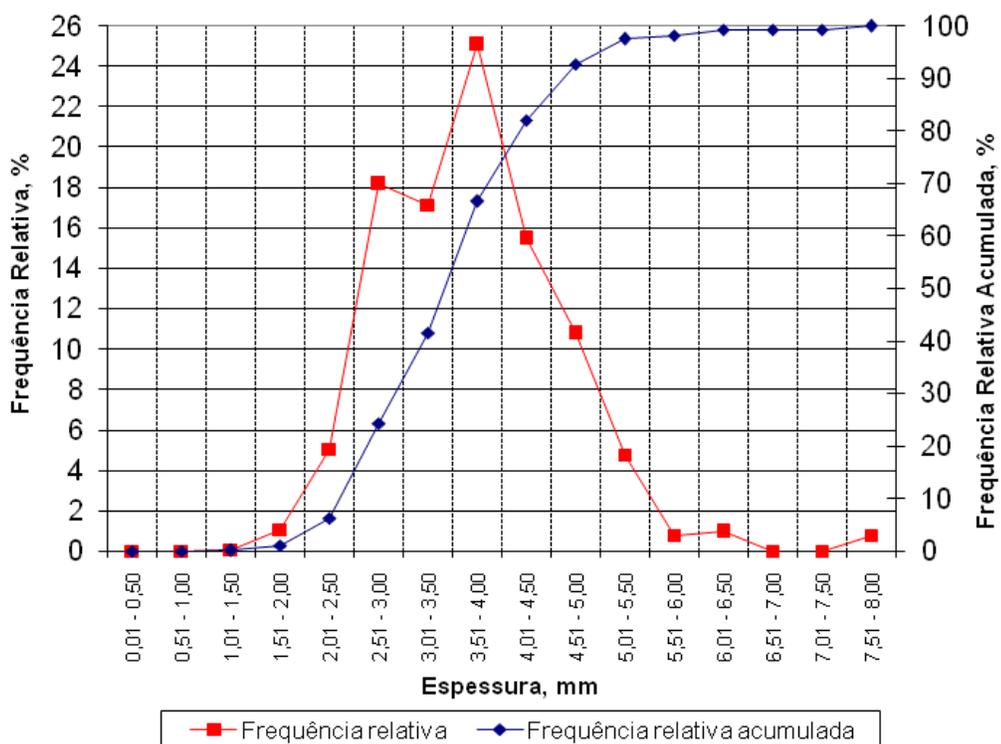
B3 - Distribuição dos cavacos por classe de espessura, 5 anos e baixa produtividade



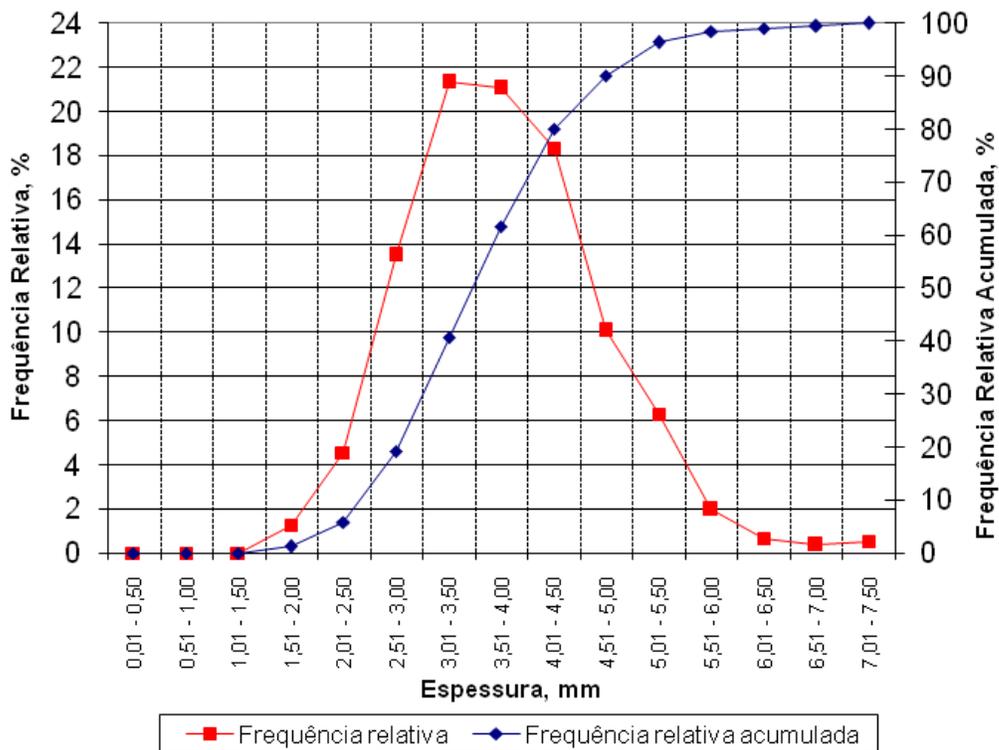
B4 - Distribuição dos cavacos por classe de espessura, 5 anos e alta produtividade



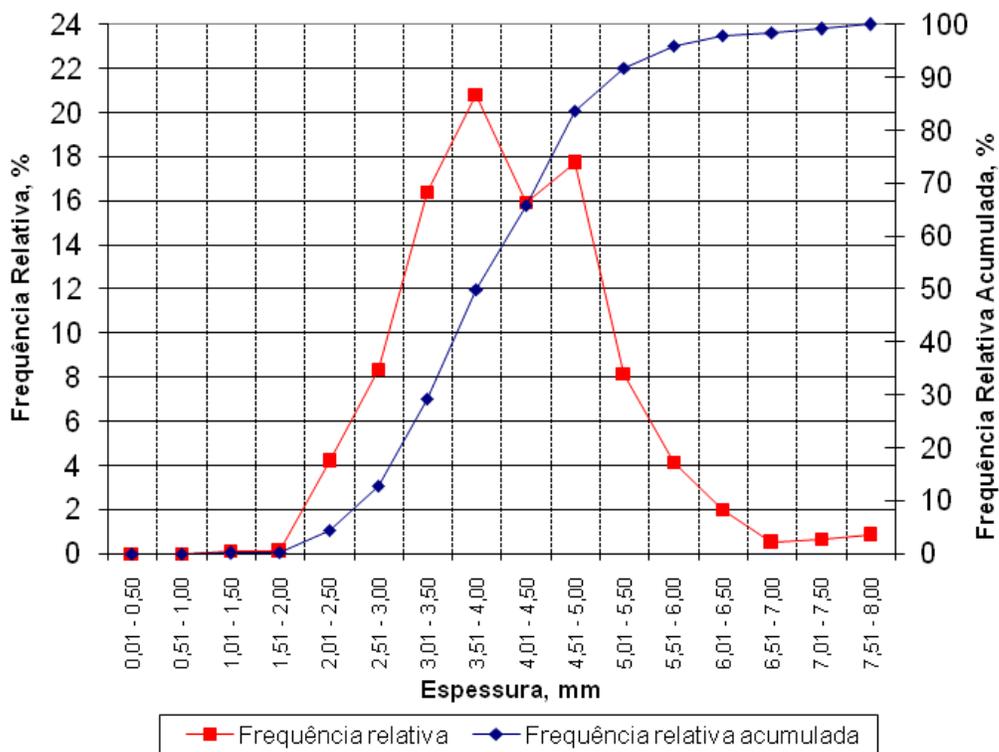
B5 - Distribuição dos cavacos por classe de espessura, 6 anos e baixa produtividade



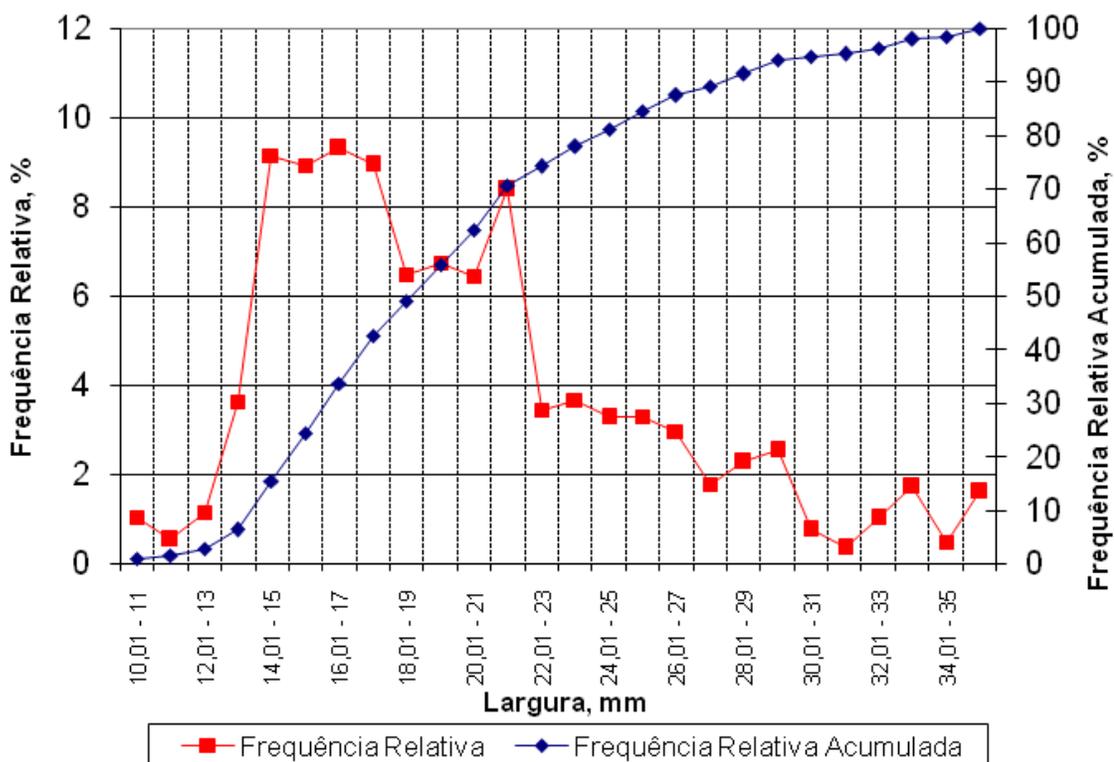
B6 - Distribuição dos cavacos por classe de espessura, 6 anos e alta produtividade



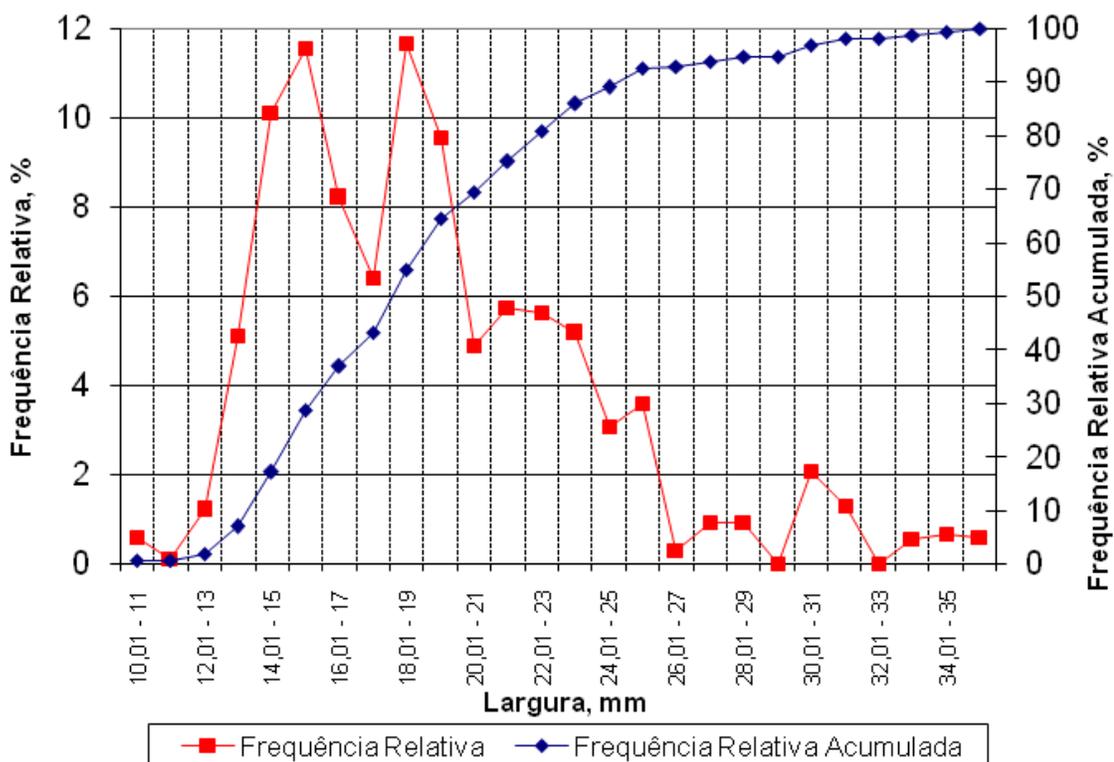
B7 - Distribuição dos cavacos por classe de espessura, 7 anos e baixa produtividade



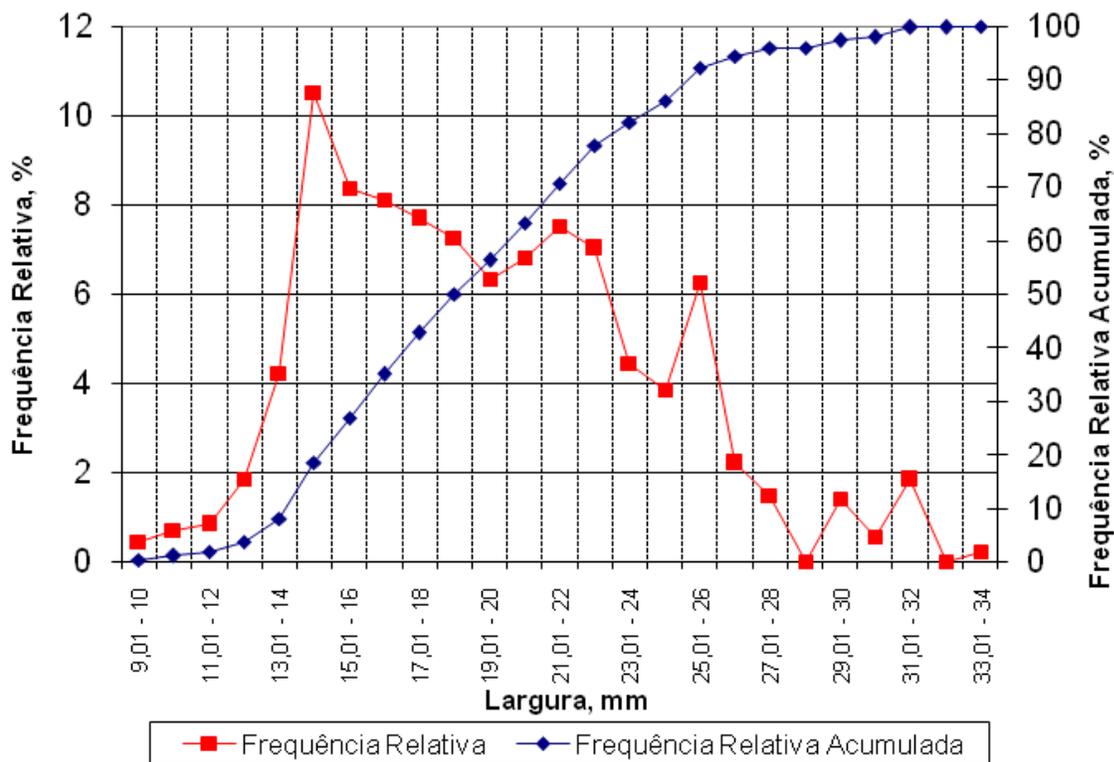
B8 - Distribuição dos cavacos por classe de espessura, 7 anos e alta produtividade



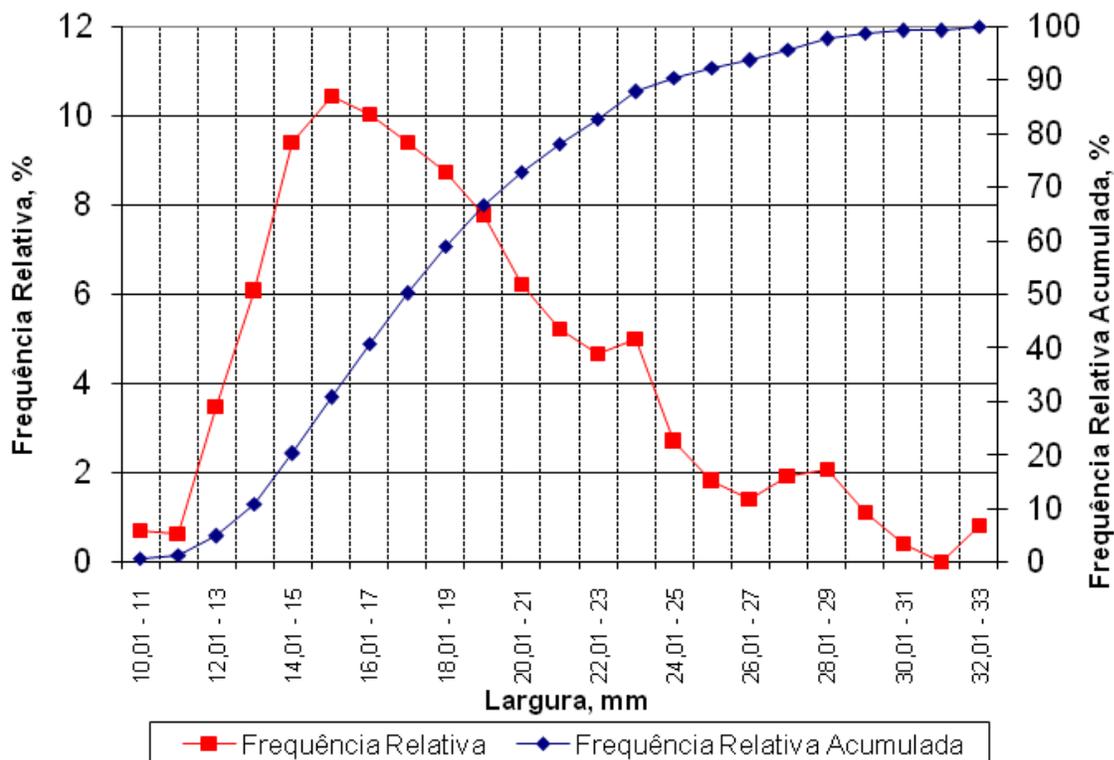
C1 - Distribuição dos cavacos por classe de largura, 4 anos e baixa produtividade



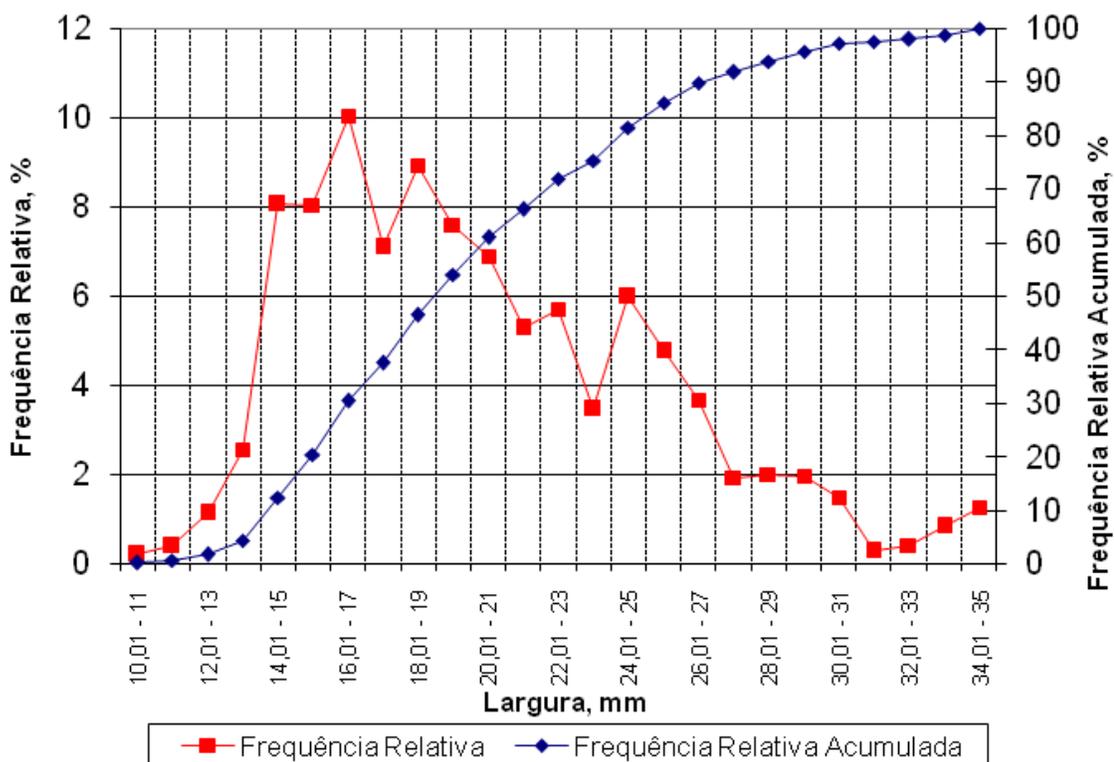
C2 - Distribuição dos cavacos por classe de largura, 4 anos e alta produtividade



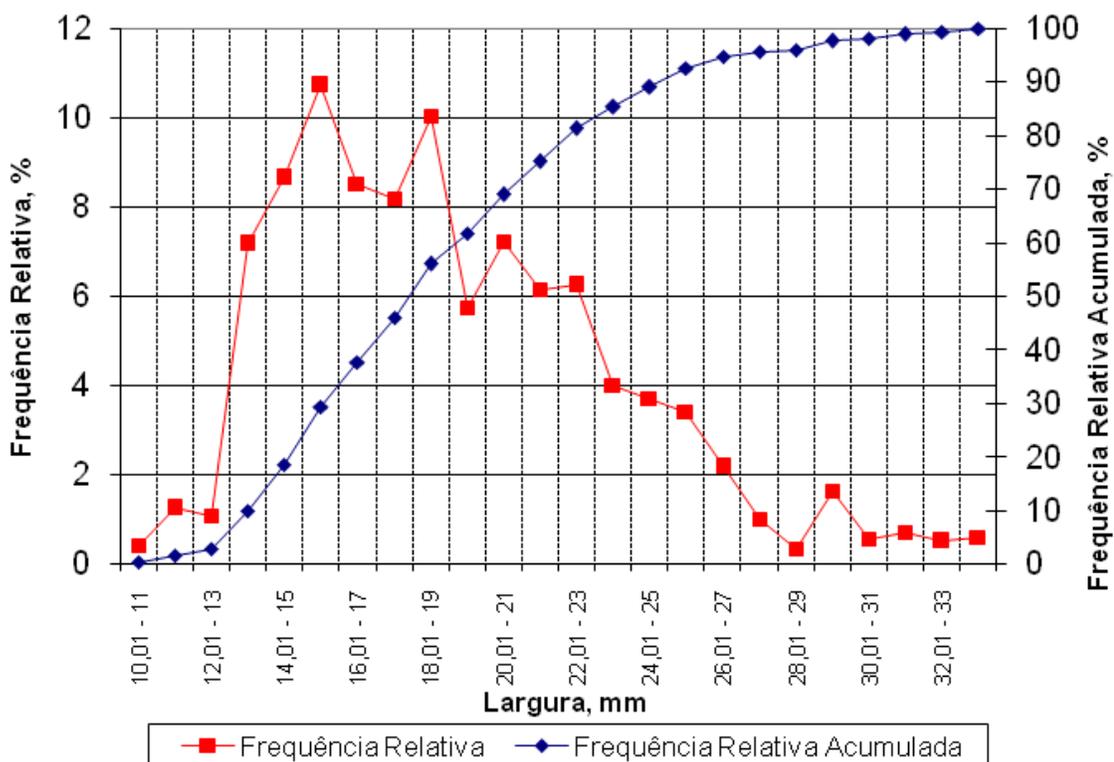
C3 - Distribuição dos cavacos por classe de largura, 5 anos e baixa produtividade



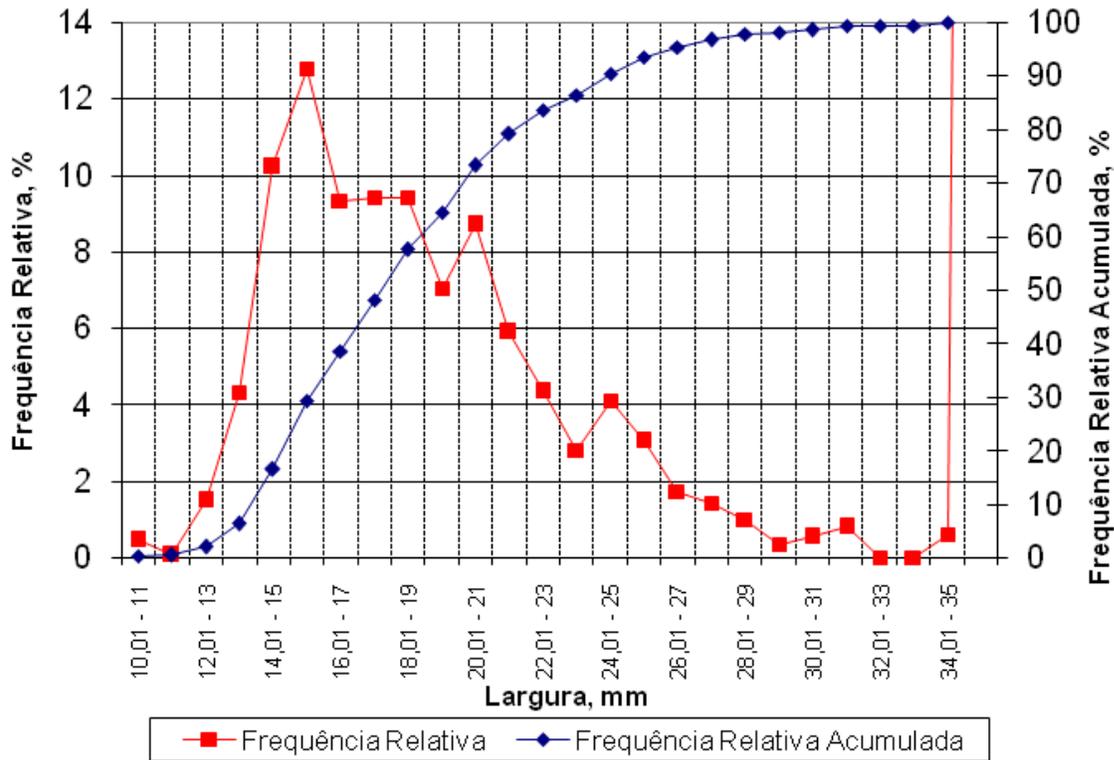
C4 - Distribuição dos cavacos por classe de largura, 5 anos e alta produtividade



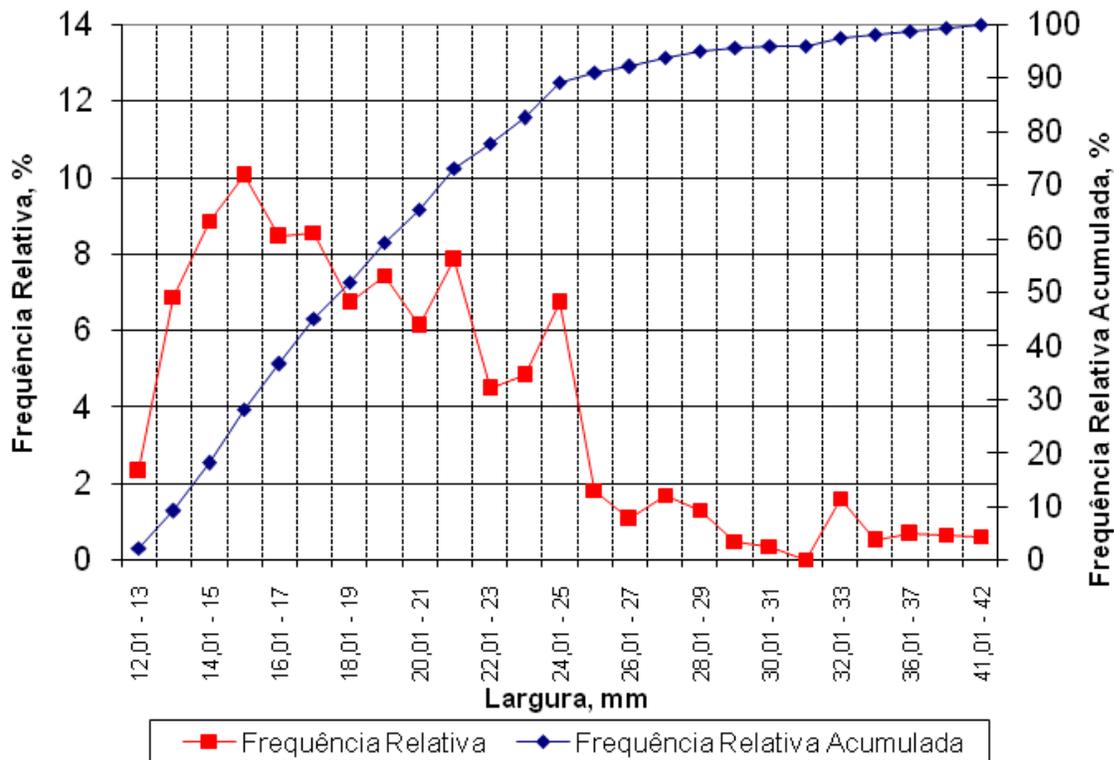
C5 - Distribuição dos cavacos por classe de largura, 6 anos e baixa produtividade



C6 - Distribuição dos cavacos por classe de largura, 6 anos e alta produtividade



C7 - Distribuição dos cavacos por classe de largura, 7 anos e baixa produtividade



C8 - Distribuição dos cavacos por classe de largura, 7 anos e alta produtividade