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

Polpação kraft de cavacos de espessura reduzida

Flavia Schmidt

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

**Piracicaba
2014**

Flavia Schmidt
Engenharia Florestal

Polpação kraft de cavacos de espessura reduzida

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

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

Piracicaba
2014

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

Schmidt, Flavia

Polpação kraft de cavacos de espessura reduzida / Flavia Schmidt. - - versão
revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2014.
131 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2014.

1. Espessura dos cavacos 2. Processo Kraft 3. Tempo reduzido de cozimento
I. Título

CDD 676.126
S335p

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

Aos meus pais, Noedir e Célia, pelo amor,
compreensão e apoio aos meus estudos.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio e amor.

Ao Marcelo, por toda paciência, incentivo e amor.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e ao Departamento de Ciências Florestais por terem me acolhido desde a graduação.

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

Aos amigos de pós-graduação Camila Sarto, Tiago Edson Segura, Magnos Alan Vivian, Eraldo Júnior Bonfatti e Laura Trebis pela amizade e discussões produtivas.

A toda equipe do Laboratório de Química, Celulose e Energia (LQCE): Denis Zago, Maria Regina Buch, Aline Reis, Isabela Giacon, Marina Zanão, José Martins e Carlos Graciani, pela amizade e ajuda nas análises.

Ao professor Hilton Thadeu Zarate Couto pela ajuda nas análises estatísticas.

À International Paper pelo fornecimento da madeira de eucalipto para à realização deste trabalho.

Ao professor José Nivaldo Garcia e a toda equipe do Laboratório de Propriedades Físicas e Processamento da Madeira da ESALQ/USP.

Ao professor Geraldo Bortoletto Júnior e a toda equipe do Laboratório de Laminação e Painéis de Madeira da ESALQ/USP, em especial ao Alex Canale.

Ao professor Mário Tomazello Filho e a toda equipe do Laboratório de Anatomia da Madeira da ESALQ/USP.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa concedida.

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

EPÍGRAFE

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,
mas pensar o que ninguém ainda pensou
sobre aquilo que todo mundo vê.” (Arthur Schopenhauer).

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	15
2 DESENVOLVIMENTO	19
2.1 Revisão bibliográfica	19
2.1.1 Dimensão dos cavacos	19
2.1.2 Processo kraft	21
2.1.3 Impregnação e difusão	24
3 METODOLOGIA.....	27
3.1 Material.....	27
3.2 Métodos.....	28
3.2.1 Picagem	28
3.2.2 Dimensões dos cavacos.....	29
3.2.3 Densidade básica dos cavacos	30
3.2.4 Densidade a granel dos cavacos	30
3.2.5 Composição química da madeira	30
3.2.6 Dimensões das fibras	31
3.3 Polpação	32
3.3.1 Cozimentos convencionais.....	32
3.3.2 Parâmetros determinados em cada cozimento	32
3.3.3 Polpa marrom.....	34
4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANALISE ESTATÍSTICA	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
5.1 Dimensões dos cavacos.....	37
5.1.1 Cavacos convencionais.....	37
5.1.2 Cavacos finos	40
5.2 Densidade básica e a granel dos cavacos	40
5.3 Dimensões das fibras	42
5.4 Composição química	45
5.5 Cozimentos convencionais.....	47
6 CONCLUSÕES	67
REFERÊNCIAS.....	69
APÊNDICES.....	75

RESUMO

Polpação kraft de cavacos de espessura reduzida

Este trabalho teve como objetivo analisar os cavacos de dimensões reduzidas inseridos em cozimentos que se utilizam de menores tempos e maiores temperaturas, de maneira a se obter as bases para o estabelecimento de um novo processo e/ou a otimização dos sistemas atualmente utilizados em escala industrial. Amostras de cavacos de referência (3,6 mm, obtidas pelo processo convencional de picagem) e de cavacos com espessura de 0,5 mm, 1 mm e 2 mm (obtidas por um gerador de partículas), do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* com 7 anos foram analisadas quanto à densidade básica, composição química e morfologia das fibras. Após a caracterização, os materiais foram submetidos à polpação kraft pelo processo convencional e foram testados três níveis de fator H com quatro níveis de álcali ativo de maneira a se estabelecer uma equação que representasse o processo e pudesse ser utilizada em cozimentos futuros. Através das equações obtidas foi possível calcular os parâmetros de rendimento depurado, álcali ativo residual, álcali ativo consumido, teor de sólidos secos, fator H e álcali ativo em função de um número kappa 18. Os resultados mostram que a densidade básica, a composição química e a morfologia das fibras da madeira não foram afetadas pelo processo de picagem. No entanto, a densidade a granel foi afetada pela espessura dos cavacos, sendo de 0,037, 0,081, 0,110 e 0,141 g.cm⁻³ para os cavacos de 0,5 mm, 1 mm, 2 mm e 3,6 mm respectivamente. No processo de polpação, as espessuras se comportaram de maneira semelhante, no entanto, a espessura de 2 mm apresentou o melhor número kappa para o fator H de 451, o de maior interesse, com o mesmo rendimento que as demais espessuras. Na análise de regressão, a espessura de 2 mm apresentou melhor rendimento, menor teor de sólidos e menor fator H (de 461), compatível com o que se pretende utilizar em processos de polpação com tempo reduzido de cozimento.

Palavras-chave: Espessura dos cavacos; Processo Kraft; Tempo reduzido de cozimento

ABSTRACT

Kraft pulping of thin chips

The objective of this work was to evaluate the performance of thin chips inserted on a short time and higher temperatures in cooking process, to obtain the basis for the establishment of a new process and / or the optimization of the currently systems used on an industrial scale. Samples of the reference chips (3,6 mm obtained by the conventional process of chipping) and thin chips with 0,5 mm, 1 mm and 2 mm (obtained by a particle generator) of the *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* hybrid with 7 years of age had their density, chemical composition and fibers morphology evaluated. After the characterization, the materials were submitted to conventional kraft pulping process and three levels of H factor with four levels of active alkali were tested to establish an equation to represent the process that can be used on future cookings. Yield, residual active alkali, consumed active alkali, dry solids, H factor and active alkali were calculated through equations, according to a kappa number 18. The results show that the basic density, chemical composition and morphology of the wood fibers were not affected by the chipping process. However, the bulk density of 0,037, 0,081, 0,110 and 0,141 g.cm⁻³ for the 0,5 mm, 1 mm, 2 mm and 3,6 mm chips, respectively, was affected by the chip thickness. On the pulping process, the different chips had the same behavior, however, 2 mm chips showed the best kappa number to H factor 451, with the same yield as the other thickness. On the regression analysis, the 2 mm chips showed better performance, lower solids content and lower H factor (461), consistent with a short time pulping process.

Keywords: Chip thickness; Kraft pulping; Short time pulping process

1 INTRODUÇÃO

O processo kraft é o principal processo químico de produção de polpa celulósica. Este processo tem sua origem em uma modificação do processo soda e foi patenteado por Dahl em 1884, buscando com a introdução do sulfato de sódio no sistema de recuperação a redução de custos de reposição de reagentes químicos. A introdução do sulfato de sódio, além da redução de custo, propiciou uma melhora significativa da qualidade da polpa, o que fez com que este processo se tornasse o mais utilizado no mundo, respondendo hoje por 97% da produção mundial de polpa celulósica (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL - BRACELPA, 2012). O processo kraft apresenta como principais vantagens a possibilidade de utilização de praticamente todos os tipos de madeira, a produção de polpas de alta qualidade com excelentes propriedades de resistências e um eficiente sistema de recuperação de reagentes químicos e de energia (GOMIDE et al., 1980).

Procurando manter a eficiência operacional do processo kraft, aumentar a produtividade da fábrica e melhorar a qualidade da polpa celulósica, o processo kraft tem passado por diversas modificações. Tais modificações deram origem aos chamados “processos modificados de polpação” que se baseiam essencialmente na distribuição do álcali ativo ao longo do processo de cozimento e na redução da temperatura de cozimento.

Os processos modificados tem como princípio a minimização da concentração de sólidos dissolvidos da madeira nas fases de deslignificação principal e residual, através da distribuição do álcali ativo, da uniformização da temperatura de cozimento, da menor concentração de lignina na fase final e da maximização da sulfidez na fase inicial de cozimento, o que torna possível uma flexibilização do processo em relação ao produto que se desejar fabricar e/ou conforme a matéria-prima empregada (BASSA, 2007).

É inquestionável o ganho tanto em qualidade como em características das polpas proporcionado pela possibilidade de divisão do álcali ativo ao longo do processo de polpação bem como a redução das temperaturas de cozimento. No entanto, a atual configuração desses processos requer um longo tempo de cozimento, devido às baixas temperaturas, e consequentemente maiores digestores para uma dada capacidade de produção e equipamentos periféricos (bombas de circulação de licores, peneiras de extração, trocadores de calor e instrumentos de

controle) representando um aumento no investimento necessário para implantação de uma unidade industrial de produção de polpa celulósica. Nos processos modificados de polpação a etapa de impregnação dos cavacos é de fundamental importância e facilitada pelos longos tempos de cozimento.

Considerando-se os aspectos mencionados anteriormente, um desafio tecnológico que se apresenta ao setor de celulose e papel é associar o conceito da distribuição do álcali ativo ao longo do processo de polpação a menores tempos de cozimento.

A redução do tempo de cozimento e aumento da temperatura de cozimento pode trazer como problema a redução da eficiência de impregnação que, por sua vez, pode levar a aumento da geração de rejeitos entre outros impactos. Uma alternativa a ser considerada para minimização deste efeito é a utilização de cavacos com espessura reduzida (0,5, 1 e 2 mm). No entanto, cavacos de espessura reduzida consomem maior energia no processo de picagem e, apesar do Brasil apresentar o menor custo de produção por tonelada de celulose (em torno de 197 US\$), a energia elétrica corresponde a um dos mais altos custos de produção, cerca de 15%, ficando atrás somente do custo da própria madeira que representa 44% do custo total (VALVERDE et al., 2006). Ainda no que se refere ao consumo de energia no processo de picagem, deve-se considerar também que nas modernas unidades de produção de polpa celulósica há excedente de energia, sendo inclusive, em alguns casos, comercializado.

Cavacos com menores espessuras poderiam sofrer maiores danos mecânicos, consumir mais reagentes no cozimento, demandar maior tempo de picagem (FOELKEL, 2009), gerar polpas heterogêneas, devido ao rápido consumo de álcali no centro destes (GUSTAFSON et al., 1989) e proporcionar redução do rendimento e da resistência da polpa, podendo comprometer ainda o sistema de circulação nos digestores (SMOOK, 2002).

Entretanto, a utilização de cavacos com espessura reduzida pode apresentar uma melhor impregnação, obtendo-se assim uma melhor deslignificação, o que pode contribuir para o aumento do rendimento e maior seletividade da polpa.

Assim, o objetivo do presente trabalho foi estudar a polpação de cavacos de espessuras reduzidas inseridos em processos com tempo reduzido de cozimento e maiores temperaturas, de maneira a se obter as bases para o estabelecimento de

um novo processo de polpação e/ou otimização dos sistemas atualmente utilizados em escala industrial. Neste contexto, os objetivos específicos são:

- Caracterizar tecnologicamente os materiais;
- Avaliar o efeito da redução do tempo de cozimento e do álcali ativo aplicado sobre as características do processo kraft considerando-se cavacos com espessuras médias de 0,5 mm, 1 mm e 2 mm de espessura;
- Estabelecer as diretrizes para o desenvolvimento de uma nova modificação do processo kraft de polpação em função dos tempos de cozimento, do álcali ativo aplicado e das dimensões dos cavacos.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 Dimensão dos cavacos

A madeira é o principal componente de custo no processo de produção de polpa celulósica. O rendimento do processo e consequentemente o resultado econômico operacional estão diretamente relacionados à qualidade dos cavacos utilizados no processo de polpação. Além disso, a homogeneidade de forma e as dimensões dos cavacos tem um importante impacto na eficiência do cozimento, pois quanto maior a variação das dimensões, maior tem que ser a eficácia do tratamento químico (INGRUBER et al., 1985).

Teoricamente, os cavacos descritos como ideais devem possuir 25 mm de largura, 25 mm de comprimento e 4 mm de espessura (MACLEOD et al., 2005). Para Foelkel (2009), os cavacos devem apresentar de 15 a 25 mm de comprimento e de 2 a 8 mm de espessura. Para Smook (2002), cavacos com 10 a 30 mm de comprimento e espessura de 3 a 6 mm são considerados de boa qualidade. As dimensões de espessura variando de 2 a 8 mm são atualmente utilizadas, pois cavacos muito finos podem gerar polpas mais heterogêneas. Isso porque, o álcali no centro do cavaco é consumido mais rapidamente do que é repostado por difusão, podendo causar até mesmo reprecipitação da lignina (GUSTAFSON et al., 1989). Já cavacos mais grossos apresentam problemas de impregnação e são uma grande fonte de geração de rejeitos. No entanto, os trabalhos descritos a seguir, têm demonstrado bons resultados com a utilização de cavacos de menores espessuras.

Nolan (1951), citado por Rydholm (1965), demonstrou o ganho de rendimento depurado em polpas produzidas com cavacos repicados (cavacos muito finos), quando comparados aos cavacos convencionais. Croy s/d, também demonstrou a diminuição do número kappa e do residual de álcali com a utilização de cavacos de folhosas com espessura de 2 a 4 mm. Couto (1979) concluiu que a utilização de cavacos obtidos a partir de árvores de *Eucalyptus urophylla* com sete anos de idade, com dimensões variando entre 0,5 e 2 mm apresentam altos rendimentos em polpação e dão origem a polpas com boas propriedades físico-mecânicas, além da facilidade de deslignificação.

Em um estudo comparativo entre cavacos de *Pinus silvestris* classificados (3 a 5 mm de largura e de 2 a 8 mm de espessura) e com distribuição normal (remoção de cavacos muito grossos e 50% de redução de finos) em cozimento convencional e SuperBatch, Tikka et al. (1992), encontraram valores ótimos de número kappa e rendimento para cavacos melhor classificados: no cozimento SuperBatch esses cavacos alcançaram número kappa de 25 com um rendimento de 47%. Além disso, o número kappa para ambos os processos foi 2 pontos menor quando se utilizou cavacos classificados do que com cavacos convencionais. O mesmo foi observado para geração de rejeitos. Ambos os processos apresentaram uma redução em média 50% nos rejeitos, sendo que ao se combinar cavacos melhor classificados e cozimento SuperBatch esse número caiu para um quarto dos rejeitos produzidos pelo sistema convencional. Com relação ao índice de tração, os autores concluíram que polpas com maiores resistências são obtidas a partir de cavacos com 3 mm de espessura.

Segundo Luu e Shariff (2003), a redução de 20% para 7% de cavacos com espessuras superiores a 8 mm pode contribuir para um aumento de 1,4% no rendimento do processo convencional kraft para uma mistura de madeira de *Abeto negro* e *Pinus*. Além disso, os autores verificaram que, para cavacos com espessuras menores de 2 mm (não considerando finos), os resultados foram similares aos cavacos de 2 - 4 mm e de 4 - 6 mm, no que diz respeito ao número kappa, a viscosidade e ao rendimento depurado, sendo que para um número kappa de 19,1 o rendimento foi de 44,2%.

Gullichsen et al. (1992) realizou cozimento kraft de cavacos de *Pinus* variando de 1 a 10 mm de espessura. Os resultados mostraram que cavacos de maiores espessuras apresentaram maior número kappa principalmente nas polpas não depuradas. Baseados neste trabalho, Dang e Nguyen (2008) traçaram um modelo para representar o conteúdo de lignina presente nessas polpas e concluíram que para cavacos com espessuras menores que 4 mm a deslignificação é mais homogênea, uma vez que tanto para polpa depurada como para polpa não depurada o conteúdo de lignina residual foi similar. Acima dessa espessura, há um aumento significativo da proporção de rejeitos.

Wang e Gullichsen s/d, estudaram o cozimento kraft de cavacos de *Pinus silvestris* de diferentes espessuras. Os cavacos de 2 mm se comportaram igualmente aos cavacos de 3, 4 e 5 mm, ou seja, apresentaram número kappa

relativamente baixo, alto rendimento e altos valores de viscosidade e comprimento de fibra.

Cavacos com espessura de 2 mm, em cozimento convencional kraft, apresentaram baixo número kappa (10,3) se comparado aos cavacos de 4 e 6 mm que apresentaram número kappa de 12,8 e 17,3 respectivamente. Apesar disso, os teores de rendimento depurado, para as três dimensões de cavacos, foram similares, em torno de 41%. (GULLICHSEN; SUNDQVIST; OY, 1995).

No entanto, Croy (s/d) estudando diferentes frações de cavacos de folhosas sobre condições constantes de cozimento kraft, verificou que cavacos abaixo de 2 mm de espessura não atingiram resultados satisfatórios quando comparados a cavacos de 2 a 6 mm.

No que se refere a dimensões de cavacos, a grande amplitude de resultados, de espécies e de processos utilizados nos diferentes trabalhos indica ser importante o aprofundamento no assunto.

2.1.2 Processo kraft

O processo kraft é o principal processo utilizado para produção de polpa celulósica no mundo. Uma das características mais importantes do processo kraft é a obtenção da polpa celulósica de alta qualidade. A qualidade da polpa é avaliada basicamente pela taxa de lignina residual (número kappa), o grau de degradação dos carboidratos (viscosidade) e as propriedades físico-mecânicas. No entanto, estas características podem sofrer alterações de acordo com algumas variáveis de processo como a álcali ativo, o tempo e temperatura de cozimento, entre outros (SILVA JR., 1995).

As reações que ocorrem no processo kraft são complexas e não totalmente compreendidas. Para uma melhor compreensão, o processo de polpação kraft pode ser subdividido em etapas, sendo:

- transporte de íons do licor de cozimento para a superfície dos cavacos;
- difusão dos íons para o interior dos cavacos;
- reações químicas entre os íons e os componentes da madeira;
- difusão dos produtos das reações para o exterior dos cavacos;
- transporte dos produtos de reação para o licor de cozimento.

Em cozimentos alcalinos, soda e kraft, a deslignificação da madeira ocorre em três estágios: inicial, principal e residual, conforme descrito por Kleppe (1970) e Rekunen et al. (1980):

- Deslignificação inicial: ocorre após a impregnação da madeira com o licor, no início do cozimento, a temperaturas inferiores a 130°C; há rápida dissolução da lignina, cerca de 15 a 25% dependendo da espécie, dos extrativos, despolimerização das hemiceluloses e da celulose na sua fração amorfa, além do rápido consumo de álcali, cerca de 50% do mesmo.

- Deslignificação principal: ocorre à remoção da maior parte da lignina; o ataque aos carboidratos continua através da hidrólise alcalina a temperaturas variando de 130 a 150°C. A celulose sofre uma ionização parcial dos seus grupos álcoois, enquanto que a lignina sofre uma ionização de seus grupos álcoois e fenóis, o que favorece as reações de solubilização, conduzindo a perda de 70% da mesma;

- Deslignificação residual: corresponde à quebra de determinadas ligações carbono-carbono da lignina; a deslignificação ocorre lentamente. Nessa fase, há uma perda de aproximadamente 3% de lignina para as folhosas. Também há uma redução significativa dos carboidratos, acompanhada de um aumento no consumo de álcali.

Apesar da alta intensidade de deslignificação e qualidade da polpa produzida, a busca por novas tecnologias que proporcionassem maiores rendimentos em polpa, maior qualidade da celulose produzida e menores danos ao meio ambiente deu origem a otimizações do processo kraft, que levaram ao desenvolvimento de sistemas mais eficazes, como por exemplo, os chamados cozimentos modificados. Outro avanço importante no desenvolvimento tecnológico relacionado à produção de polpa pelo processo kraft corresponde aos cozimentos contínuos.

Os cozimentos contínuos são baseados no constante processamento dos cavacos e na constante produção de polpa. Este processo requer o uso constante de reagentes químicos e permite a implementação de perfis de álcali e temperatura ao longo do processo (KROTSCHKEK, 2006). A partir desses cozimentos, algumas modificações ocorreram e deram início aos cozimentos contínuos modificados (MCC), que levam em conta a concentração de álcali ativo, a sulfidez, o perfil da lignina dissolvida e a força iônica presente nos diferentes estágios de cozimento; as mencionadas modificações consideram também a introdução de licor branco após a

vaporização dos cavacos e a implementação de etapas de cozimento em contracorrente (KROTSCHKEK, 2006).

Entre os modernos processos modificados de polpação está o processo *Lo-Solids®* que tem como princípio a redução da concentração de sólidos dissolvidos em ambas as fases de deslignificação principal e final do cozimento, mantendo-se o perfil de álcali e temperaturas constante durante todo cozimento. O processo em si apresenta maior seletividade, uma vez que há maior remoção da lignina dissolvida e dos íons de sódio através das múltiplas extrações (MIYANISHI; SHIMADA, 2001).

Segundo Herschmiller (1998) apud Silva Júnior e McDonough (2002) alguns princípios básicos devem ser seguidos no desenvolvimento de cozimentos modificados:

- o perfil alcalino deve ser mantido constante ao longo do processo de cozimento, evitando-se altas concentrações de álcali no início do mesmo;
- a sulfidez deve ser mantida alta na fase de deslignificação inicial e no começo da fase de deslignificação principal;
- especialmente na fase final do cozimento, a concentração de lignina e de íons de sódio deve ser mantida em um nível baixo, uma vez que podem acarretar problemas de alvura, viscosidade, e maior consumo de licor branco introduzido;
- a temperatura em geral deve ser mantida baixa, principalmente no início e no fim do cozimento.

Comparado a outros processos de polpação, o processo *Lo-Solids®* proporciona maior resistência e viscosidade da polpa, menor necessidade de reagentes químicos no cozimento, menor temperatura de cozimento, cozimento mais uniforme ao longo do digestor, maior eficiência de lavagem do digestor, menores índices de deposição, melhor movimento da coluna de cavacos e melhorias no branqueamento da polpa, reduzindo o uso de reagentes químicos nocivos ao meio ambiente (TURNER JR.; STROMBERG, 1999).

No entanto, esses processos modificados requerem longos tempos de cozimentos, devido às baixas temperaturas, e consequentemente representam um aumento no investimento necessário para implantação de uma unidade industrial de produção de polpa celulósica. Assim, o presente trabalho buscou avaliar a inserção de cavacos de espessuras reduzidas associados a menores tempos em um cozimento convencional kraft para se estabelecer as bases para utilização em processos modificados.

2.1.3 Impregnação e difusão

A impregnação e a difusão são duas fases importantes para a eficiência do processo kraft. Vários fatores influenciam a impregnação e a distribuição dos reagentes químicos nos cavacos de madeira, tais como: dimensões dos cavacos, pressão hidrostática, temperatura do licor, relação licor/madeira, concentração alcalina do licor, umidade dos cavacos, fenômenos de difusão e penetração, pH etc. Todos esses fatores exercem influência no início do cozimento e todos eles se relacionam à uniformidade do cozimento e à qualidade do produto final (BUSNARDO; FOELKEL, 1979).

Uma impregnação deficiente pode causar maus resultados, como polpa contendo alto teor de lignina, com alto teor de rejeitos, baixas propriedades finais e baixa braqueabilidade. O aumento da uniformidade da polpa através de uma impregnação completa pode diminuir o tempo de reação e prevenir reações indesejadas de lignina (GUSTAFSON et al., 1989).

A difusão, em cavacos de espessura reduzida, proporciona uma impregnação mais uniforme, pois a velocidade de penetração por difusão no comprimento e largura do cavaco é baixa, assim ela ocorre principalmente no sentido da espessura (FOELKEL, 2009).

Costanza e Costanza (2002) estimaram a difusão no sentido radial da madeira, uma vez que essa direção é normalmente relacionada à espessura dos cavacos industriais. Estes autores concluíram que, tanto a difusão, como os mecanismos de reação são importantes na polpação alcalina, e que ambos os processos são influenciados pela concentração de álcali e pela temperatura principalmente, que afeta o coeficiente de difusão e as reações cinéticas.

A taxa de migração dos reagentes químicos é diretamente afetada pela área de difusão, coeficiente de difusão e pelo gradiente de concentração. O coeficiente de difusão é influenciado pela temperatura, segundo a primeira lei de Fick (HULTHOLM et al., 1997). Essas condições, além de afetar o transporte de químicos na madeira, também afetam a taxa aparente de reação na polpa. Se a temperatura for muito alta, há um aumento na taxa de deslignificação, que excede a taxa de difusão. Assim, há o consumo de reagentes químicos, mas não o transporte dos mesmos (HULTHOLM et al., 1997).

Gustafson et al. (1989), trabalhando com não uniformidade da polpa da madeira de coníferas em cozimento kraft, concluíram que cavacos com menores espessuras e com maiores relações de licor madeira, são mais impactados pelo processo de difusão.

Assim, visando uma boa impregnação e uma boa difusão no cozimento convencional kraft com aplicação de tempo reduzido e maiores temperaturas, os cavacos tiveram suas espessuras reduzidas, de maneira a se evitar o aumento da geração de rejeitos entre outros impactos.

3 METODOLOGIA

3.1 Material

Para realização deste estudo, foi utilizada madeira oriunda de plantios comerciais de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com 7 anos de idade provenientes do Estado de São Paulo, da cidade de Mogi Guaçu (Figura 1), latitude de 23°31'22"S e longitude de 46°11'16"W.

Figura 1 – Localização da cidade de Mogi Guaçu no Estado de São Paulo

Foram amostradas 60 árvores com DAP (diâmetro a altura do peito, 1,30 m) correspondente ao DAP médio do povoamento (dados de inventário). As árvores abatidas foram seccionadas em toras com no mínimo 2 m de comprimento até 15 cm de diâmetro a partir da base.

As toras coletadas foram desdobradas em tábuas com 25 mm de espessura e aleatoriamente separadas em 4 lotes com 30 tábuas/lote. Um dos lotes de tábuas foi submetido a processamento em picador visando à geração de cavacos convencionais (referência); as demais tábuas (90 tábuas) foram inicialmente processadas em serra pêndulo visando a obtenção de blocos com comprimento variável (transversal às fibras), altura de 25 mm (espessura da tábua) e largura de 30 mm; estes blocos foram posteriormente processados em gerador de partículas para obtenção de cavacos com espessura de 0,5 mm, 1 mm e 2 mm, comprimento de 30 mm e largura de 25 mm.

3.2 Métodos

3.2.1 Picagem

Visando a obtenção de cavacos convencionais (referência) um lote de 30 tábuas foi processado em picador móvel Modelo Demuth D3P250, o qual origina cavacos de diversas espessuras (Figura 2). Os cavacos obtidos foram processados em peneira laboratorial visando a remoção dos finos (espessura menor que 2 mm) e de *over-size* (espessura maior que 8 mm).

Figura 2 – A: Picador de escala laboratorial; B: cavacos de referência

Os cavacos com espessura de 0,5 mm, 1 mm e 2 mm foram obtidos a partir do processamento das tábuas em um gerador de partículas localizado no Laboratório de Laminação e Painéis de Madeira LLAPAM da ESALQ/USP (Figura 3).

A metodologia utilizada para produção de cavacos com espessura de 0,5 mm, 1 mm e 2 mm teve por objetivo minimizar possíveis efeitos das demais dimensões dos cavacos sobre os resultados obtidos neste trabalho, isolando-se assim o efeito “espessura de cavacos”. Alternativamente, poderia ter sido utilizada a estratégia de fracionamento de uma amostra de cavacos convencionais por classes de espessura, mas as demais dimensões dos cavacos não estariam sob controle, podendo impactar nos resultados a serem obtidos. Adicionalmente, observa-se que em amostras de cavacos convencionais, a espessura está diretamente relacionada ao tamanho médio dos cavacos; desta forma cavacos com espessura inferior a 2 mm normalmente correspondem a fração denominada “finos”.

Figura 3 – A: gerador de partículas; B: cavacos com 2 mm de espessura; C: cavacos com 1 mm de espessura e D: cavacos com 0,5 mm de espessura

3.2.2 Dimensões dos cavacos

3.2.2.1 Cavacos convencionais

Para determinação das dimensões dos cavacos (comprimento, largura e espessura), foram preparadas três amostras de cavacos com 0,250 kg. Os cavacos foram medidos com paquímetro e separados em classes com amplitude de 1 mm para comprimento e largura e 0,5 mm para espessura.

Os cavacos, após serem medidos e classificados, foram colocados em estufa a $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ até atingirem peso constante. Com base no peso seco total e no peso seco da classe, foi calculada a frequência relativa de cada classe. Os resultados destas análises foram apresentados em figuras de distribuição de frequência relativa e absoluta.

3.2.2.2 Cavacos finos

Para determinação da espessura dos cavacos finos foram preparadas três amostras de cavacos com 0,100 kg. Os cavacos foram medidos com um micrômetro externo mecânico e a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação para cada espessura foi calculado.

3.2.3 Densidade básica dos cavacos

A densidade básica das quatro amostras de cavacos foi determinada em triplicata utilizando-se o método do máximo teor de umidade, de acordo com a norma NBR 11941/2003.

3.2.4 Densidade a granel dos cavacos

A densidade a granel dos cavacos foi determinada pelo método volumétrico. Este método consiste na pesagem dos cavacos, absolutamente secos, em um recipiente de volume conhecido. Para isso foi utilizada uma balança semi-analítica com duas casas decimais. O recipiente de 1 litro foi tarado e os cavacos foram soltos a partir de uma altura aproximada de 30 cm, anotando-se então o respectivo peso. Foram realizadas três repetições e a densidade a granel foi obtida através da seguinte equação:

$$\rho_{ag} = \frac{m_{ag}}{V_{ag}}$$

Onde:

ρ_{ag} = densidade a granel;

m_{ag} = massa seca dos cavacos;

V_{ag} = volume a granel dos cavacos secos.

3.2.5 Composição química da madeira

Para cada material em estudo (cavacos com espessura de 0,5 mm, 1 mm, 2 mm e referência), obteve-se uma sub-amostra para as determinações do teor de

extrativos totais, teor de lignina solúvel e insolúvel e o teor de holocelulose, conforme a metodologia utilizada no Laboratório de Química, Celulose e Energia (LQCE) do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP (Apêndice A). A serragem dos cavacos de madeira foi obtida em moinho de laboratório, após a classificação desta em um conjunto de peneira de 40 e 60 mesh; as análises foram realizadas em triplicatas.

3.2.6 Dimensões das fibras

Para cada material em estudo (cavacos com espessura de 0,5 mm, 1 mm, 2 mm e referência), obteve-se uma sub-amostra para maceração pelo método de Franklin (JOHANSEN, 1940), que consiste na dissolução das fibras por peróxido de hidrogênio e ácido acético na proporção de 1:1 durante 48h em estufa a uma temperatura de 60°C. Após o término do tratamento, o material foi lavado com água destilada para remoção dos reagentes.

Com as fibras dissociadas, foram preparadas 10 lâminas histológicas para cada material e medidas um total de 100 fibras (10 fibras/lâmina). As lâminas foram analisadas em um microscópio de luz e através do programa de análise de imagem *Leica Application Suite* foi possível determinar as seguintes dimensões: comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume, de acordo com a norma da International Association of Wood Anatomists – IAWA (1989).

Os resultados foram apresentados como sendo a média aritmética das 100 medições que foram efetuadas para cada dimensão. A partir destas dimensões, foram calculadas as seguintes relações:

$$\text{- Fração Parede (\%): } \frac{2 \times EP}{L} \times 100$$

$$\text{- Coeficiente de Flexibilidade (\%): } \frac{DL}{L} \times 100$$

$$\text{- Índice de Enfeltramento: } \frac{C}{L}$$

$$\text{- Índice de Runkel: } \frac{2 \times EP}{DL}$$

Onde:

EP: Espessura da parede, μm ;

L: Largura da fibra, μm ;

C: Comprimento da fibra, mm;

DL: Diâmetro do lúmen, μm .

3.3 Polpação

3.3.1 Cozimentos convencionais

Os cozimentos convencionais kraft foram realizados em triplicata em uma autoclave rotativa com capacidade total de 20 litros, contendo 8 cápsulas de aço inoxidável individualizadas, cada uma com capacidade para 450 ml. As condições dos cozimentos são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 - Condições do processo para o cozimento de avaliação

Parâmetro	Condição
Álcali Ativo (base NaOH), %	15,5, 17,5, 19,5, 21,5
Sulfidez, %	25
Aquecimento, min.	variável
Cozimento, min.	variável
Temperatura, °C	170
Relação licor/madeira, L/kg	4

Foram realizadas três curvas de caracterização utilizando-se tempos de aquecimento e cozimento de 90 + 60 min., 60 + 40 min. e 40 + 20 min., que correspondem aos fatores H de 1244, 829 e 451, calculados de acordo com a seguinte fórmula:

$$FH = \int_0^T e^{(43,33-16161,62)/T}$$

Onde:

T= temperatura Kelvin, K.

3.3.2 Parâmetros determinados em cada cozimento

Na tabela 3, são apresentados os parâmetros do processo de polpação determinados para cada cozimento.

Tabela 3 - Parâmetros determinados nas polpas produzidas

Parâmetro	Norma/Procedimento
Rendimento bruto	Relação entre a massa a.s. de celulose e a massa a.s. de madeira
Rendimento depurado	Relação entre a massa a.s. de celulose depurada e a massa a.s. de madeira
Teor de rejeitos	Relação entre peso a.s. de rejeitos (material retido em peneira com fenda de 0,2mm de depurador laboratorial) e peso a.s. de madeira
Número kappa	TAPPI Methods – T236cm-85
Álcali ativo residual, pH e sulfidez	TAPPI Methods - T699

3.3.2.1 Álcali ativo consumido por tonelada de celulose

Para o cálculo do álcali ativo consumido por tonelada de celulose, base NaOH (kg.tsa⁻¹), a seguinte expressão foi utilizada:

$$AAC = \frac{(AAA - AAR) \times LM}{RD} \times 0,9$$

Onde:

AAA: Álcali ativo aplicado, em g.L⁻¹;

AAR: Álcali ativo residual, em g.L⁻¹;

LM: Relação licor/madeira, em L.kg⁻¹;

RD: Rendimento Depurado, em decimal;

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

3.3.2.2 Teor de sólidos secos

O teor de sólidos secos gerados por tonelada de polpa celulósica produzida (tss/adt), $t \cdot tsa^{-1}$, pode ser calculado através da expressão:

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

Onde:

RD: Rendimento Depurado, em decimal;

RB: Rendimento Bruto, em decimal;

AA: Álcali Ativo aplicado, em decimal;

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

3.3.3 Polpa marrom

Após cada cozimento, a polpa obtida foi lavada abundantemente com água corrente para a completa remoção do licor negro. A polpa foi desintegrada e a separação dos rejeitos da polpa foi efetuada em depurador laboratorial com fenda de 0,2 mm. A polpa depurada foi centrifugada, acondicionada em sacos de polietileno e armazenada em câmara fria.

4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA

O delineamento utilizado neste trabalho foi o inteiramente casualizado. Os parâmetros de caracterização dos materiais foram analisados estatisticamente pelo programa SAS v. 9.3 através da Análise de Variância (ANOVA); quando a Análise de Variância detectou diferença estatística para algum parâmetro entre os materiais em questão, realizou-se o teste de comparação de médias de Tukey ao nível de 5% de significância (95% de confiança) e posteriormente análise de regressão Stepwise.

Através das equações geradas pela análise de regressão, foi possível obter o fator H e o álcali ativo em função de um número kappa 18, de maneira que estes valores foram utilizados, posteriormente, nos cálculos dos demais parâmetros. Como essas equações permitem inúmeras combinações de álcali ativo e fator H, optou-se pela combinação inicial que expressa o menor fator H, que é o de maior interesse para a realização de cozimentos com tempo reduzido. Utilizando-se a ferramenta *Solver* do Excel, os dados iniciais de 451 de fator H e de 15,5% de álcali ativo foram recalculados visando-se atingir o número kappa 18. A partir desses resultados o fator H e o álcali ativo foram aplicados às demais fórmulas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dimensões dos cavacos

5.1.1 Cavacos convencionais

As dimensões dos cavacos são de fundamental importância no processo de polpação. Elas influenciam principalmente a etapa de impregnação e, em função de uma boa impregnação, é possível obter uma designificação mais uniforme, o que contribui para o aumento do rendimento e maior seletividade da polpa (GULLICHSEN; SUNDQVIST, 1992).

Na tabela 4 são apresentados os resultados das dimensões dos cavacos de referência.

Tabela 4 – Dimensão dos cavacos de referência

Dimensão	Média Ponderada	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação, %	Máximo	Mínimo
Comprimento, mm	23,45	5,47	25,38	48,1	5,78
Largura, mm	15,15	5,89	48,64	37,8	2,07
Espessura, mm	3,67	1,07	33,85	7,23	0,66

*Média ponderada em função da massa seca dos cavacos

A análise dos resultados apresentados na tabela 4 mostra que os cavacos de referência apresentam dimensões adequadas para produção de polpa celulósica, sendo o comprimento médio de 23,45 mm, largura de 15,15 mm e espessura de 3,67 mm.

Segundo Oliveira e Santoro (1999), citados por Pimenta (2005), para obter uma melhor qualidade dos cavacos, esses devem apresentar o comprimento variando de 20 a 25 mm, a largura de 14 a 17 mm e a espessura de 2 a 8 mm, evitando-se cavacos com espessuras menores que 2 mm ou com mais de 8 mm.

Costa (2011) estudou os cavacos obtidos através da picagem de cinco árvores com 6 anos de idade do híbrido das espécies *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Os cavacos apresentaram as seguintes dimensões médias: comprimento 20,62 mm, largura 11,50 mm e espessura 3,15 mm e são bastante próximos aos valores obtidos no presente trabalho.

Nas figuras 4, 5 e 6, é apresentada a distribuição das dimensões dos cavacos para melhor visualização.

Figura 4 – Distribuição dos cavacos por classe de espessura

A espessura dos cavacos influencia o rendimento e a qualidade da polpa e é reconhecida como sendo a dimensão mais crítica dos cavacos. Andrade et al. (1978) estudaram a influência da espessura dos cavacos sobre a qualidade da celulose kraft. Os autores admitiram como mais recomendável se trabalhar com cavacos cuja maior frequência de espessura se encontre na faixa de 4 a 6 mm, sendo, porém, admissível cavacos com espessura entre 2 e 8 mm, desde que a proporção de cavacos com dimensões próximas a estes extremos seja mínima.

Analisando-se as classes de espessuras, observa-se que 65% dos cavacos apresentam espessura variando de 3 a 4 mm, valores adequados para produção de polpa celulósica. Lombardo e Padilla (1998) relatam que pelo menos 60% dos cavacos devem apresentar dimensões dentro dessa amplitude de 2 a 8 mm para que uma penetração mais rápida e uniforme do licor ocorra.

Figura 5 – Distribuição dos cavacos por classe de comprimento

Figura 6 – Distribuição dos cavacos por classe de largura

O comprimento e a largura de cavacos destinados a processos de polpação são de importância secundária em relação à espessura destes quando se consideram os aspectos de impregnação. Em termos de processo, cavacos compridos ou largos tendem a apresentar dificuldades de manipulação e transporte além de dificultar o aproveitamento volumétrico dos digestores (VASCONCELOS, 2005). No entanto, o comprimento dos cavacos é considerado a dimensão mais

importante para a penetração do licor através do diferencial de pressão, pois este processo ocorrerá anteriormente ao processo de difusão, esse sim relacionado à espessura (FOELKEL, 2009). Ao observar o comprimento dos cavacos, 40% destes se encontram na faixa de 22 a 27 mm.

Já para a largura, 60% dos cavacos se encontram acima de 10 mm e abaixo de 30 mm, o que não representa impactos ao processo de polpação.

A classificação dos cavacos em classes dimensionais permite um maior nível de detalhamento da qualidade desses, quando comparado com a classificação em peneiras e nos permite inferir sobre sua influência no processo de polpação.

5.1.2 Cavacos finos

Na tabela 5 são apresentados os resultados das dimensões dos cavacos de finos.

Tabela 5 – Dimensão dos cavacos de espessura reduzida

Espessura (mm)	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)	Máximo	Mínimo
0,5	0,47	0,09	18,50	0,76	0,33
1,0	1,02	0,13	12,97	1,55	0,64
2,0	2,01	0,15	7,23	2,40	1,68

É possível observar que os cavacos têm espessuras médias condizentes com o esperado, apresentando um baixo coeficiente de variabilidade, o que comprova a qualidade do equipamento empregado na obtenção das espessuras desejadas.

A homogeneidade da espessura dos cavacos permite uma impregnação eficiente dos produtos químicos de polpação bem como a transferência de calor e por consequência uma melhor deslignificação.

5.2 Densidade básica e a granel dos cavacos

Na indústria de celulose e papel, uma adequada avaliação da densidade básica é de extrema importância e pode fornecer informações acerca do rendimento do processo e da impregnação dos cavacos, além de estar associada à resistência físico-mecânica e a qualidade da polpa.

A densidade básica é um parâmetro utilizado para descrever a qualidade da madeira pois está relacionada às características físicas, químicas e anatômicas dessa. Em relação à estrutura anatômica da madeira, a densidade básica varia de acordo com proporção de vasos, parênquima, espessura da parede celular, entre outros (SANTOS, 2005).

Na tabela 6 se encontram os valores de densidade básica do híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis* para as diferentes espessuras estudadas.

Tabela 6 – Densidade básica e a granel dos cavacos de *E. urophylla* x *E. grandis* para as diferentes espessuras

Parâmetro	Referência	0,5 mm	1,0 mm	2,0 mm
Densidade básica, g·cm ⁻³	0,444 a	0,430 a	0,434 a	0,440 a
Densidade a granel, g·cm ⁻³	0,141 a	0,037 d	0,081 c	0,110 b

*As médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, a um nível de 5% de probabilidade

Conforme esperado, a densidade básica para as diferentes espessuras não apresentou diferença estatística significativa (Apêndice B). Isso corresponde ao fato de que todas as espessuras derivam do mesmo material e, apesar de apresentarem diferentes técnicas de corte, não houve influência do processo/equipamento neste parâmetro.

Carvalho e Nahuz (2001), estudando híbridos *E. grandis* x *E. urophylla*, observaram valores de densidade básica de 0,490 g/cm³, ligeiramente acima do presente trabalho. Duarte (2007), trabalhando com o mesmo híbrido, verificou valores variando de 0,458 a 0,478 g/cm³, enquanto Queiróz et al. (2004) encontrou valores de 0,447 g/cm³, consoantes com o presente estudo.

Os resultados de densidade básica indicam que a madeira utilizada neste trabalho pode ser considerada como representativa do material comercial utilizado para produção de polpa celulósica no Brasil.

Ainda com relação aos resultados apresentados na tabela 5, os valores de densidade a granel apresentaram diferença estatística significativa para todas as espessuras testadas, mostrando que quanto menor a espessura menor a densidade a granel. É possível se observar uma relação entre densidade a granel e a espessura média dos cavacos (Figura 7).

Figura 7 - Relação entre a espessura dos cavacos e a densidade a granel.

A densidade a granel é um parâmetro diretamente relacionado com a capacidade de alimentação de cavacos aos digestores, bem como de seu aproveitamento volumétrico. A utilização de cavacos com baixa densidade a granel pode comprometer a capacidade de produção de polpa celulósica de uma determinada unidade industrial. Em que pese as possíveis vantagens de utilização de cavacos de espessura reduzida, no desenvolvimento de processos com tempos reduzidos, devem ser consideradas possíveis alternativas de melhor aproveitamento do volume dos digestores como, por exemplo, a compactação dos cavacos utilizando-se roscas cônicas.

Com relação aos cavacos de referência, esses apresentaram valores de densidade a granel menores que os encontrados na literatura. Segura (2012) encontrou valores de 0,201 g/cm³ para os híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* com seis anos de idade, enquanto Longue Júnior e Colodette (2011) encontraram valores de 0,198 g/cm³ para o mesmo híbrido com sete anos de idade.

5.3 Dimensões das fibras

Na avaliação de matérias-primas destinadas à produção de polpa celulósica, é importante se considerar as dimensões de fibras e suas relações. Esses

parâmetros se relacionam entre si e estão ligados às propriedades físico-mecânicas da polpa produzida. No entanto, segundo Barrichelo e Brito (1976), esses parâmetros não devem ser analisados isoladamente sendo recomendada a sua análise através de índices e relações que possam traduzir melhor as correlações existentes.

Na tabela 7, estão apresentados os resultados médios da análise de dimensões das fibras para as quatro diferentes espessuras utilizadas. A análise estatística encontra-se apresentada no Apêndice C.

Tabela 7 – Dimensões das fibras da madeira de *E. urophylla* x *E. grandis* para as diferentes espessuras de cavacos

Parâmetro	Referência	0,5 mm	1,0 mm	2,0 mm
Comprimento, mm	1,06 a	1,05 a	1,06 a	1,07 a
Largura, μm	20,04 a	19,89 a	19,57 a	19,91 a
Diâmetro do lúmen, μm	13,82 a	13,69 a	13,37 a	13,46 a
Espessura da parede, μm	3,11 a	3,10 a	3,10 a	3,23 a

*As médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, a um nível de 5% de probabilidade

Considerando-se que os processos de produção de cavacos não alteram a estrutura anatômica intrínseca da madeira, nota-se que não houve qualquer diferença estatística entre as dimensões das fibras dos cavacos de diferentes espessuras. Para o mesmo híbrido, Tomazello Filho (2006) observou valores do diâmetro do lume entre 11,1 e 12,8 μm ; comprimento de 0,95 a 1,15 mm; largura de 18,49 a 18,81 μm . Para espessura de parede celular, o mesmo autor relatou valores variando de 3,1 a 3,4 μm .

Duarte (2007) descreveu valores de diâmetro do lume um pouco inferiores ao presente trabalho, variando de 10,38 a 10,44 μm . Para a espessura de parede celular foram encontrados valores superiores, de 3,65 a 4,21 μm . O comprimento variou de 1,12 a 1,19 mm e largura de 17,72 a 18,78 μm .

No entanto, Segura (2012) encontrou valores de diâmetro do lume, largura e comprimento mais consoantes com este trabalho, sendo eles de 13,7 μm , 20,83 μm e 1,04 mm respectivamente.

Shimoyama e Barrichelo (1991) ressaltam a importância das dimensões das fibras, a partir das quais é possível inferir as características da madeira e da polpa celulósica produzida. De maneira geral, quanto maior o comprimento da fibra, maior será a resistência do papel.

Uma das mais importantes características da fibra é a espessura da parede celular; Foelkel (1977) concluiu que a resistência da celulose é largamente influenciada pela espessura da parede celular e que existe uma correlação positiva entre a espessura parede celular e o rendimento em polpa celulósica, porque as fibras com paredes mais espessas possuem mais celulose do que fibras com paredes mais finas.

Carvalho et al. (1998) relatam que fibras com maiores espessuras de parede celular são mais resistentes à tração devido ao maior desfibramento que sofrem durante o processo de refinação, o que aumenta o potencial de ligações interfibras.

A fim de se verificar as relações existentes entre as diferentes dimensões das fibras, os índices qualitativos da madeira foram calculados e são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Médias dos índices qualitativos da madeira de *E. urophylla* x *E. grandis* para as diferentes espessuras de cavacos

Parâmetro	Referência	0,5 mm	1,0 mm	2,0 mm
Índice de Runkel	0,45	0,45	0,46	0,48
Fração Parede (%)	31,0	31,0	32,0	32,0
Coeficiente de Flexibilidade (%)	69,0	69,0	68,0	68,0
Índice de Enfeltramento	53,0	52,9	54,3	53,6

Entre os índices e relações observados, um dos mais amplamente utilizados é o índice de Runkel. Este índice avalia o grau de colapso das fibras durante o processo de produção de papel. Sabe-se que a madeira com até 1,5 pontos no índice de Runkel é mais adequada para a produção de celulose, e as espécies com baixo índice são consideradas ainda mais apropriadas (BARRICHELO; BRITO, 1976) pois, quanto menor for o índice, maior será o grau de colapso das fibras, o que permitirá maiores interligações e conseqüentemente maior resistência do papel. Na tabela 8, nota-se que os valores para o índice de Runkel são inferiores a 0,5, o que indica que essa madeira é muito boa para a produção de papel.

Ainda com relação às dimensões de fibras, considera-se que fibras rígidas e pouco flexíveis possuem fração parede superior a 40%; valores superiores a 40% para fração parede são indicativos de dificuldades nas ligações entre fibras, o que pode resultar em polpas com menores resistências à tração e ao arrebetamento. A fração parede das fibras da madeira utilizada no presente trabalho é em média 32% e condiz com trabalhos publicados por Segura (2012).

Em relação ao coeficiente de flexibilidade, temos que o mesmo se relaciona ao fato de que quanto maior a flexibilidade da fibra maior a possibilidade de ligações entre fibras na fabricação de papel. Assim há o acréscimo na resistência à tração e ao arrebetamento (FOELKEL, 2009).

As fibras do material estudado apresentam uma ótima flexibilidade (em média 68%). Segundo Mokfienski (2004), madeiras com menor fração parede e maior coeficiente de flexibilidade são mais desejáveis para a produção de papel de imprimir e escrever.

O índice de enfiamento está associado às resistências ao rasgo e ao arrebetamento, havendo uma diminuição no arrebetamento com o aumento da largura da fibra (BARRICHELO; BRITO, 1976).

Podemos notar que a madeira em questão apresenta baixo índice de Runkel, alto coeficiente de flexibilidade, boa porcentagem de fração parede e bom índice de enfiamento, comprovando assim a qualidade do híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla* para produção de polpa celulósica destinada a produção de papéis de impressão e escrita ou tissue.

5.4 Composição química

A composição química da madeira é um aspecto bastante importante para produção de celulose, pois se relaciona às características como a demanda de álcali a ser aplicado, rendimento do processo e o teor de sólidos gerados.

Na tabela 9 se encontram os resultados da análise química para as quatro diferentes espessuras estudadas, como a determinação do teor de extrativos, da lignina solúvel, insolúvel, total e da holocelulose. A análise estatística completa se encontra no Apêndice D.

Tabela 9 – Composição química da madeira de *E. urophylla* x *E. grandis* para as diferentes espessuras de cavacos

Componente	Referência	0,5 mm	1,0 mm	2,0 mm
Extrativos totais, %	4,46 a	4,65 a	4,50 a	4,39 a
Lignina Klason insolúvel, %	27,40 a	27,13 a	27,45 a	27,53 a
Lignina Klason solúvel, %	2,40 a	2,58 a	2,45 a	2,28 a
Lignina Klason total, %	29,80 a	29,70 a	29,89 a	29,81 a
Holocelulose, %	65,74 a	65,65 a	65,61 a	65,79 a

*As médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, a um nível de 5% de probabilidade

Os materiais avaliados não apresentaram qualquer diferença estatística com relação aos seus componentes químicos, indicando que os processos de produção de cavacos utilizados neste trabalho não apresentam efeito sobre as características químicas da madeira.

O teor de extrativos do material utilizado no presente trabalho é superior ao normalmente encontrado na literatura. Queiroz et al. (2004) trabalhando com o híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla* encontrou valores de 2,73 a 3,45% para o teor de extrativos. Santos (2005), trabalhando com dois híbridos dessa mesma espécie encontrou valores de extrativos de 3,29 e 3,87%. Duarte (2007) observou valores variando de 2,3 a 3,98%. Já Costa (2011) verificou que, para os 5 híbridos de eucalipto com 6 anos de idade testados, o teor de extrativos variou entre 6,09 a 10,62%, o que mostra que há uma variação em relação aos componentes químicos dos mesmos, isso porque fatores edafoclimáticos, genéticos e fisiológicos podem interferir na qualidade da madeira.

Um alto teor de extrativos não é desejável no processo de produção de polpa celulósica, pois os mesmos consomem mais álcali e podem levar ao aparecimento de depósitos de “pitch” (BARBOSA; MALTHA; CRUZ, 2005).

Com relação à lignina total, os dados aqui apresentados estão consoantes com a literatura. Almeida (2003), estudando dois clones de *E. grandis* x *E. urophylla*, observou valores de 28,81 a 29,83% de lignina total. Mokfienski (2004) verificou valores de 27,6 a 28% e Bassa (2002) valores de 28,73%.

Quanto maior o teor de lignina, maior é a carga de álcali necessária para que a deslignificação ocorra, mantendo-se constantes todos os demais parâmetros do

processo de polpação, o que pode comprometer o rendimento do processo, uma vez que os carboidratos também serão removidos. Além disso, condições mais drásticas de cozimento geram maiores quantidades de sólidos dissolvidos no licor negro residual, o que pode limitar a capacidade de produção de polpa celulósica em função da limitação da queima de sólidos na caldeira de recuperação (MOKFIENSKI, 2004).

O teor de holocelulose está relacionado ao rendimento do processo e, de acordo com Costa (2011), Bassa (2007) e Santos (2005), os valores encontrados no presente estudo estão dentro dos padrões verificados pelas autoras, que encontraram valores de 62,13 a 67,38%, 68,90% e de 64,61 a 67,12%, respectivamente.

Os resultados de caracterização dos materiais mostram que a madeira do híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla* utilizado neste trabalho pode ser considerada como representativa do material comercialmente utilizado no Brasil para produção de polpa celulósica de fibra curta.

Os processos de produção de cavacos utilizados neste trabalho não alteram as propriedades relacionadas a qualidade da madeira, tais como densidade básica, dimensões de fibras e relações e composição química. Conforme esperado, a redução da espessura dos cavacos tem como consequência a redução da densidade a granel.

5.5 Cozimentos convencionais

Os cozimentos convencionais foram realizados com o objetivo de se avaliar o efeito da espessura dos cavacos sobre os principais parâmetros do processo de polpação, bem como fornecer subsídios para definição da amplitude de variação das principais variáveis de processo aplicáveis aos cozimentos modificados com tempo reduzido.

Em uma primeira análise, foi verificada a homogeneidade das variâncias para a realização da ANOVA. Os dados obtidos tanto para o número kappa quanto para o álcali ativo residual não obedeceram ao pressuposto da homogeneidade das variâncias. Assim, procedeu-se então a transformação Box-Cox (BOX; COX, 1964), que é uma das possíveis formas de se contornar o problema (Apêndice E).

Após a transformação, foi realizada a análise de variância (Apêndice F) para determinar se as variáveis fator H do cozimento e álcali ativo exercem influência significativa sobre os parâmetros número kappa, rendimento depurado, álcali ativo residual, álcali ativo consumido e teor de sólidos secos. Também foi testada a interação entre os fatores para cada uma das espessuras. Como o resultado da análise de variância mostrou que esses fatores são estatisticamente significativos foi realizado então o Teste de Tukey.

O Teste de Tukey foi agrupado por parâmetro, de maneira a visualizar o comportamento de cada variável com relação ao fator H e ao álcali ativo, fatores que influenciam altamente os resultados finais. Na tabela 10, vemos os resultados deste teste (Apêndice G) para o número kappa, com relação ao álcali ativo.

Tabela 10 – Análise estatística - número kappa em função do álcali ativo aplicado por espessura

Espessura dos cavacos	Número kappa			
	Álcali ativo (%)			
	15,5	17,5	19,5	21,5
0,5 mm	36,03 Aa	21,62 Ab	16,58 Ac	15,32 Ad
1 mm	33,17 Aa	19,79 Ab	17,74 Ac	16,59 Ad
2 mm	28,89 Aa	19,86 Ab	16,89 Ac	15,76 Ad
3,6 mm	32,36 Aa	23,83 Ab	19,78 Ac	17,07 Ad

*As médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e da mesma letra maiúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Pode-se observar na tabela 10 que há diferença estatística para todas as espessuras estudadas com relação a todas as cargas alcalinas. Comparativamente entre as espessuras não se observou diferença significativa.

A produção de polpas de eucalipto se destina na sua quase totalidade a produção de polpas branqueáveis e para este objetivo o número kappa após o cozimento é uma das principais variáveis de referência operacional, ou seja, as demais variáveis de processo são ajustadas para obtenção de polpa após cozimento com número kappa especificado; no caso das indústrias brasileiras de celulose, o número kappa médio após o cozimento varia entre 17 e 19. Os resultados apresentados na tabela 10 mostram que, entre as cargas alcalinas testadas, a de 19,5% proporciona polpas com número kappa típicos de polpas de eucalipto destinadas ao branqueamento.

Com relação às diferenças entre as cargas alcalinas, é possível observar na figura 8, conforme esperado, há uma diminuição do número kappa com o aumento do álcali ativo para todas as espessuras estudadas, pois com uma maior porcentagem de álcali temos uma maior intensidade de deslignificação no processo. Quanto menor a carga utilizada, maior é o número kappa, pois cargas muito baixas possibilitam uma deslignificação heterogênea, resultando na formação de rejeitos.

Figura 8 - Número kappa em função do álcali ativo aplicado

Além disso, o aumento drástico da temperatura na fase de impregnação associado ao rápido consumo de álcali pelas espessuras reduzidas, principalmente a de 0,5 mm e 1 mm, resulta em alta degradação das hemiceluloses e celulose, o que gera um alto consumo de álcali para neutralizar os ácidos formados pela degradação dos carboidratos. Com isso, há diminuição do pH e pode ocorrer a reprecipitação da lignina, o que contribui para o aumento do número kappa (GOMIDE, 1979).

Apesar do baixo valor de número kappa ser um fator interessante quanto à facilidade de branqueamento da polpa, temos que polpas não branqueadas com número kappa variando de 16 a 19 já são suficientemente qualificadas para esta finalidade, o que não justifica utilizar elevado álcali ativo (FOELKEL, 2007). No caso, o álcali ativo de 21,5% poderia ser desqualificado, pois este contribui para o aumento da velocidade de deslignificação e, apesar de apresentar números kappa

abaixo de 18 ± 1 , implicam em um alto consumo de reagentes e em um decréscimo de rendimento. Além disso, verifica-se que há uma queda mais acentuada do número kappa da carga de 15,5% para a de 17,5% do que de 19,5% para 21,5%, o que evidencia ainda mais o fato da carga de 21,5% ser excessiva.

Na tabela 11, encontram-se os resultados do Teste de Tukey (Apêndice H) para o número kappa, com relação ao fator H.

Tabela 11 – Análise estatística - resultados do número kappa em função do fator H aplicado por espessura

Espessura dos cavacos	Número kappa		
	Fator H		
	451	829	1244
0,5 mm	28,81 Aa	21,7 Ab	16,64 Ac
1 mm	28,49 Aa	20,72 Ab	16,26 Ac
2 mm	24,98 Aa	19,44 Ab	16,63 Ac
3,6 mm	29,53 Aa	20,96 Ab	19,69 Ac

*As médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e da mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Conforme verificado anteriormente, também não se constatou diferença significativa entre as espessuras para o número kappa. No entanto, entre os fatores H, este parâmetro se mostrou significativo. Na figura 9, têm-se a relação entre o fator H e o número kappa.

Figura 9 - Número kappa em função do fator H aplicado

O fator H expressa a relação entre tempo e temperatura e, segundo Silva-Júnior (1997), estas variáveis se relacionam de forma inversa, ou seja, quanto menor o tempo maior será a temperatura utilizada. Neste trabalho, adotou-se uma temperatura máxima de 170 °C, variando-se apenas o tempo de aquecimento para os diferentes fatores H. Assim, quanto menor o fator H, menor o tempo de cozimento aplicado, o que se enquadraria melhor na configuração de um processo mais rápido. No entanto, conforme mostrado na figura 9, o menor fator H ocasionou o maior número kappa, devido à baixa taxa de remoção da lignina, o que possivelmente acarretaria na utilização de maiores cargas alcalinas para se atingir o número kappa desejado.

Observa-se também que, conforme maior o fator H, menor o número kappa devido ao melhor processo de deslignificação. A um fator H de 1244, as espessuras de 0,5 mm, 1 mm e 2 mm apresentaram números kappa bastante próximos e abaixo de 18 ± 1 , o que poderia indicar que a utilização de um fator H intermediário, mais próximo de um processo mais curto, associado com valores de álcali ativo intermediário, geraria os melhores resultados.

Os resultados das análises estatísticas para rendimento depurado (Apêndice I) com relação ao álcali ativo aplicado são mostrados na tabela 12.

Tabela 12 – Análise estatística - rendimento depurado em função do álcali ativo aplicado por espessura

Espessura dos cavacos	Rendimento depurado			
	Álcali ativo (%)			
	15,5	17,5	19,5	21,5
0,5 mm	54,52 Aa	52,45 Ab	52,11 Ab	51,11 Ab
1 mm	55,90 Aa	53,10 Ab	52,33 Abc	51,25 Ac
2 mm	55,25 Aa	53,44 Ab	52,55 Abc	51,23 Ac
3,6 mm	54,40 Aa	54,11 Aa	52,50 Aab	51,82 Ab

*As médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e da mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Entre as espessuras é possível observar que não houve variação significativa de rendimento depurado. Para o álcali ativo aplicado, tem-se que a maior diferença se encontra entre o álcali de 15,5% e os demais, uma vez que este álcali gera maiores números kappa, o que contribui para o aumento deste parâmetro. No entanto, apesar de apresentar o número kappa mais baixo, a espessura de 2 mm apresentou resultados de rendimento depurado semelhantes às demais espessuras, o que indica um melhor aproveitamento dessa espessura.

Também é possível verificar que há uma diminuição do rendimento depurado com o aumento do álcali ativo, conforme mostrado na figura 10. Isso ocorre devido a maior quantidade de álcali aplicado que promove maior degradação dos componentes da madeira, principalmente da celulose, uma vez que o licor de cozimento não é seletivo para lignina, o que contribui para a diminuição do rendimento depurado.

Figura 10 - Rendimento depurado em função do álcali ativo aplicado

Rendimentos depurados acima de 50% são considerados determinantes na tomada de decisão quanto à utilização ou não de um material. No caso, todas as espessuras utilizadas resultaram em rendimentos depurados superiores a 50%.

A tabela 13 evidencia os resultados do Teste de Tukey (Apêndice J) para o parâmetro rendimento depurado com relação ao fator H.

Tabela 13 – Análise estatística - rendimento depurado em função do fator H aplicado por espessura

Espessura dos cavacos	Rendimento depurado		
	Fator H		
	451	829	1244
0,5 mm	54,03 Aa	52,70 Bb	50,92 Ac
1 mm	54,54 Aa	53,41 ABb	51,49 Ac
2 mm	54,84 Aa	53,28 ABb	51,24 Ac
3,6 mm	52,82 Ab	54,83 Aa	51,97 Ab

*As médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e da mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Observa-se que entre os fatores H a análise estatística para rendimento depurado foi significativa para todas as espessuras. Entre as espessuras somente

ocorreu diferença estatística entre os cavacos de referência, de 3,6 mm, e a espessura de 0,5 mm a um fator H de 829, conforme visualizado na figura 11.

Figura 11 - Rendimento depurado em função do fator H aplicado

Nota-se que houve um ótimo de rendimento no fator H de 829 para os cavacos de referência, o que pode indicar que para esta espessura a utilização de um fator H mais próximo de 800 é mais adequada. Também se verifica que houve um decréscimo de rendimento para o fator H de 451, pelo fato deste dar origem a maior quantidade de rejeitos, conforme a tabela 14. Esses valores de rendimento são resultados de uma desdesignificação não uniforme, devido ao baixo de tempo de cozimento que não permite uma boa impregnação de cavacos mais grossos. Desse modo, cavacos mais espessos geram polpas mais heterogêneas porque o álcali no interior do cavaco é consumido mais rápido do que é repostado por difusão (GUSTAFSON et al., 1989).

Assim, a diminuição no rendimento depurado, fez com que ambos os rendimentos do fator H de 451 e 1244 para esta espessura não fossem estatisticamente diferentes, uma vez que o rendimento do fator H de 1244 já é relativamente mais baixo que os outros e apresentou menor teor de rejeitos.

Tabela 14 – Teor de rejeitos por espessura de cavaco e desvio padrão

Espessura dos cavacos	Teor de rejeitos (%)		
	Fator H		
	451	829	1244
0,5 mm	0,15 ± 0,52	0,04 ± 0,14	0
1 mm	0,02 ± 0,06	0,01 ± 0,03	0
2 mm	0,08 ± 0,14	0,03 ± 0,12	0
3,6 mm	1,62 ± 1,34	0,55 ± 0,76	0,12 ± 0,2

O menor teor de rejeitos alcançado pelas menores espessuras mesmo sob as condições mais drásticas demonstra uma boa oportunidade de aproveitamento deste material nas indústrias de celulose que se utiliza de números kappa maiores após o processo de polpação.

Nota-se ainda que o rendimento tende a aumentar conforme se diminui o fator H. O alto rendimento conseguido para o fator H de 451 deve-se ao alto número kappa alcançado nessas condições, devido à baixa deslignificação dos cavacos.

Em termos industriais, os valores dos teores de rejeito apresentados na tabela 14 para os cavacos de espessura reduzida podem ser considerados muito baixos e não significativos a ponto de provocar qualquer alteração negativa nos processos de depuração. Já para os cavacos de referência (3,6 mm de espessura), um fator H entre 829 e 1244 pode proporcionar teores de rejeitos compatíveis com o dimensionamento de sistemas de depuração industriais para polpas branqueáveis de eucalipto.

Na tabela 15, são apresentados os resultados do Teste de Tukey (Apêndice K) para o parâmetro álcali ativo residual com relação ao álcali ativo.

Tabela 15 – Análise estatística - álcali ativo residual em função do álcali ativo aplicado por espessura

Espessura dos cavacos	Álcali ativo residual (g.L ⁻¹)			
	Álcali ativo (%)			
	15,5	17,5	19,5	21,5
0,5 mm	4,02 Bd	7,07 Ac	9,73 Bb	12,67 Ba
1 mm	5,19 ABd	8,21 Ac	10,12 Bb	13,53 ABa
2 mm	5,68 Ad	8,62 Ac	11,08 ABb	14,24 ABa
3,6 mm	6,01 Ad	8,52 Ac	12,06 Ab	14,93 Aa

*As médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e da mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

De acordo com a tabela, as diferenças de álcali ativo residual são estatisticamente significativas entre o álcali ativo e significativo entre algumas espessuras, principalmente entre a espessura de 0,5 mm e as demais, o que pode ser visualizado na figura 12.

Figura 12 - Álcali ativo residual em função do álcali ativo aplicado

Verifica-se que a espessura de 0,5 mm apresentou o menor álcali ativo residual, principalmente a uma carga de 15,5%. Sabe-se que cavacos de dimensões reduzidas tendem a consumir o álcali mais rapidamente pelo processo de difusão, resultando em menor álcali ativo residual ao final do processo, o que indica que essa carga não é suficiente para manter em solução a lignina dissolvida (GOMIDE, 1979), uma vez que segundo Grace et al. (1989) deve-se procurar manter a concentração de álcali ativo residual do licor na faixa de 6 a 12 g/L (base NaOH), para se evitar a reprecipitação da lignina.

Observa-se também que quanto maior o álcali ativo, maior é o álcali ativo residual, pois há um excesso de álcali utilizado, mostrando que altas cargas devem ser evitadas para que se reduzam os gastos com reagentes. Deste modo, tanto a utilização de cargas muito altas quanto muito baixas não é adequada ao processo.

O álcali ativo residual (Apêndice L) com relação ao fator H é mostrado na tabela 16 e no figura 13.

Tabela 16 – Análise estatística - resultados do álcali ativo residual em função do fator H aplicado por espessura

Espessura dos cavacos	Álcali ativo residual (g.L ⁻¹)		
	Fator H		
	451	829	1244
0,5 mm	9,31 Aa	8,15 Ab	7,67 Ab
1 mm	9,72 Aa	9,37 Aab	8,70 Ab
2 mm	10,48 Aa	10,04 Aab	9,19 Ab
3,6 mm	11,56 Aa	10,38 Ab	9,19 Ac

*As médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e da mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Conforme apresentado na tabela, observa-se que não existe diferença significativa entre as espessuras, no entanto, essa diferença existe principalmente entre o fator H de 451 e os demais, que não diferem entre si exceto para o cavaco de 3,6 mm.

Observando a figura 13, tem-se que o álcali ativo residual tende a ser maior quanto menor for o fator H, pois se tem uma deslignificação e uma impregnação menos eficiente, que consome menos álcali restando mais álcali ao final do processo. Isso indica que para maiores fatores H deve-se utilizar cargas maiores para que sobre álcali ativo suficiente ao final do processo.

Figura 13 - Álcali ativo residual em função do fator H aplicado

A tabela a seguir demonstra os resultados obtidos no Teste de Tukey (Apêndice M) para o parâmetro álcali ativo consumido por tonelada de celulose com relação ao álcali ativo.

Tabela 17 – Análise estatística - resultados do álcali ativo consumido em função do álcali ativo aplicado por espessura

Espessura dos cavacos	Álcali ativo consumido (kg.tsa ⁻¹)			
	Álcali ativo (%)			
	15,5	17,5	19,5	21,5
0,5 mm	229,39 Ad	251,58 Ac	269,63 Ab	289,13 Aa
1 mm	216,90 Ad	241,37 Ac	266,22 Ab	281,84 ABa
2 mm	219,22 Ad	241,16 Ac	263,46 ABb	284,14 Aa
3,6 mm	217,28 Ad	234,97 Ac	251,38 Bb	269,62 Ba

*As médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e da mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Verifica-se que entre os álcalis ativos aplicados há diferença estatística, mas entre as espessuras não houve diferença principalmente entre as cargas de 15,5 e 17,5%. Entre as cargas de 19,5 e 21,5%, para os cavacos de referência (3,6 mm), houve diferença com relação às demais espessuras, o que evidencia o menor consumo de álcali para esta espessura, como pode ser constatado na figura 14.

Desse modo, menor será o consumo de reagente para se atingir um mesmo rendimento quando se utilizar de cargas maiores para esta espessura.

Figura 14 - Álcali ativo consumido em função do álcali ativo aplicado

Pode-se observar também que o álcali ativo aplicado de 21,5% foi o que apresentou maior consumo de álcali. Isso ocorreu porque altas cargas acarretam maior degradação dos carboidratos e, conseqüentemente, menores rendimentos depurados.

Os resultados das análises estatísticas para álcali ativo consumido (Apêndice N) com relação ao fator H são apresentados na tabela 18 e na figura 15.

Tabela 18 – Análise estatística - resultados do álcali ativo consumido em função do fator H aplicado por espessura

Espessura dos cavacos	Álcali ativo consumido (kg.tsa ⁻¹)		
	Fator H		
	451	829	1244
0,5 mm	246,72 Ab	264,30 Ab	268,77 Aa
1 mm	241,30 Ac	249,55 ABb	263,89 Aa
2 mm	242,67 Ab	252,59 ABa	260,62 Aa
3,6 mm	236,14 Ab	236,92 Bb	256,88 Aa

*As médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e da mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Através da tabela 18 e da figura 15, observa-se que os cavacos de referência alcançaram o menor consumo de álcali, sendo estatisticamente diferente dos cavacos de 0,5 mm, que apresentaram o maior consumo. O maior consumo de álcali associado a menor espessura deve-se a maior degradação dos carboidratos e, conseqüentemente, ao menor rendimento. Essa diferença está presente no fator H de 829, pois este foi o que apresentou os melhores resultados de rendimento para os cavacos de referência.

Figura 15 - Álcali ativo consumido em função do fator H aplicado

Foi observado que quanto menor o fator H menor é o consumo alcalino, uma vez que com uma menor deslignificação, menor foi a degradação dos carboidratos e conseqüentemente maior foi o número kappa e maior foi o rendimento, diminuindo assim o consumo por tonelada de celulose. Apesar do alto rendimento e do menor consumo de reagentes, deve-se atentar para o alto valor de kappa, que não é interessante nas indústrias que trabalham com o branqueamento da polpa celulósica.

A tabela 19 evidencia os resultados obtidos no Teste de Tukey (Apêndice O) para o parâmetro teor de sólidos secos gerados por tonelada de celulose com relação ao álcali ativo.

Tabela 19 – Análise estatística – teor de sólidos secos em função do álcali ativo aplicado por espessura

Espessura dos cavacos	Teor de sólidos secos (t.tsa ⁻¹)			
	Álcali ativo (%)			
	15,5	17,5	19,5	21,5
0,5 mm	1,01 Ac	1,12 Ab	1,16 Ab	1,24 Aa
1 mm	0,96 Ad	1,09 Ac	1,16 Ab	1,23 Aa
2 mm	0,99 Ad	1,08 Ac	1,15 Ab	1,23 Aa
3,6 mm	0,98 Ab	1,05 Ab	1,14 Aa	1,21 Aa

*As médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e da mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

De acordo com a tabela 19, é possível visualizar que não existe diferença estatística entre todas as espessuras estudadas em todos os álcalis ativos aplicados. Esta diferença ocorre entre os álcalis ativos para uma mesma espessura, sendo que para os cavacos de referência pode-se optar pela utilização das cargas de 17,5 ou 19,5% e das cargas de 15,5 ou 17,5% pois elas não diferem estatisticamente entre si.

Figura 16 - Teor de sólidos secos em função do álcali ativo aplicado

Segundo Segura (2012), o teor de sólidos secos consiste em todos os sólidos gerados, orgânicos e inorgânicos, no processo de polpação provenientes do licor de cozimento ou da madeira. A maior geração de sólidos pode comprometer a capacidade de produção de uma fábrica, pois normalmente as unidades industriais de produção de polpa celulósica apresentam como gargalo a capacidade de queima de sólidos/dia da caldeira de recuperação.

Com o aumento do álcali ativo aplicado há um aumento da geração de sólidos devido à maior deslignificação, que aumenta os sólidos dissolvidos no licor. Assim, onde não há diferença estatística entre os álcalis, pode-se optar por utilizar um álcali ativo um pouco menor, para se evitar a maior geração de sólidos.

Na tabela 20 e na figura 17, observam-se os valores obtidos para o teor de sólidos secos (Apêndice P) com relação ao fator H.

Tabela 20 – Análise estatística - resultados do teor de sólidos secos por tonelada de celulose em função do fator H aplicado por espessura

Espessura dos cavacos	Teor de sólidos secos (t.tsa ⁻¹)		
	Fator H		
	451	829	1244
0,5 mm	1,07 Ac	1,13 Ab	1,20 Aa
1 mm	1,06 Ac	1,10 Ab	1,17 Aa
2 mm	1,05 Ac	1,10 Ab	1,18 Aa
3,6 mm	1,04 Ab	1,09 Aab	1,15 Aa

*As médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e da mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

É possível visualizar na tabela 20 que não houve diferença estatística entre as espessuras estudadas para o teor de sólidos secos gerados por tonelada de celulose produzida, mas sim entre os fatores H. No entanto, para os cavacos de referência não houve diferença entre os fatores H de 451 e 829, ressaltando a escolha de um fator H de 829 para a obtenção dos melhores resultados para esses cavacos.

Figura 17 - Teor de sólidos secos em função do fator H aplicado

Com relação à figura 17, tem-se que quanto maior o fator H maior é o teor de sólidos secos gerados por tonelada de celulose, uma vez que quanto maior o tempo utilizado no processo de polpação, maior será a possibilidade de deslignificação.

Para que fosse possível realizar uma comparação entre as diferentes espessuras para um número kappa 18, foi realizada a análise de regressão Stepwise (Apêndice Q). As equações obtidas podem ser visualizadas nas próximas tabelas.

Tabela 21 – Análise estatística - parâmetros estimados pela análise de regressão para a espessura de 0,5 mm

0,5 mm	R ²
$\ln(k) = 1,05323 - 0,00056421 * FH + 44,5427 * (1/AA)$	0,83
$RD = 46,03471 - 0,00394 * FH + 179,11724 * (1/AA)$	0,65
$AAR = -19,47313 + 1,431 * AA + 974,72332 * (1/FH)$	0,95
$AAC = -243,96868 + 180,86659 * \ln(AA) - 15958 * (1/FH)$	0,91
$TSS = 1,74896 + 0,00000008847203 * FH^2 - 12,54369 * (1/AA)$	0,81

*Onde: k: número kappa; RD: rendimento depurado (%); AAR: álcali ativo residual (g.L⁻¹); AAC: álcali ativo consumido (kg.tsa⁻¹); TSS: teor de sólidos secos (t.tsa⁻¹); FH: fator H e AA: álcali ativo aplicado (%).

Tabela 22 – Análise estatística - parâmetros estimados pela análise de regressão para a espessura de 1 mm

1 mm	R²
$\ln(k) = 4,31865 - 0,48016 \cdot \ln(FH) + 34,49677 \cdot (1/AA)$	0,83
$RD = 41,28976 - 0,00000226 \cdot FH^2 + 249,67091 \cdot (1/AA)$	0,82
$AAR = -2,75277 - 0,000000759661 \cdot FH^2 + 0,03638 \cdot AA^2$	0,90
$AAC = 439,0068 + 0,00001679 \cdot FH^2 - 3664,89222 \cdot (1/AA)$	0,92
$TSS = 1,85228 + 0,000000084218 \cdot FH^2 - 14,75172 \cdot (1/AA)$	0,92

*Onde: k: número kappa; RD: rendimento depurado (%); AAR: álcali ativo residual (g.L⁻¹); AAC: álcali ativo consumido (kg.tsa⁻¹); TSS: teor de sólidos secos (t.tsa⁻¹); FH: fator H e AA: álcali ativo aplicado (%)

Tabela 23 – Análise estatística - parâmetros estimados pela análise de regressão para a espessura de 2 mm

2 mm	R²
$\ln(k) = 3,64245 - 0,36842 \cdot \ln(FH) + 32,40468 \cdot (1/AA)$	0,89
$RD = 45,08217 - 0,00455 \cdot FH + 216,25942 \cdot (1/AA)$	0,69
$AAR = -15,35477 + 1,40778 \cdot AA - 0,000000964117 \cdot FH^2$	0,91
$AAC = -65,84587 + 10,85258 \cdot AA + 17,59709 \cdot \ln(FH)$	0,88
$TSS = 0,27728 + 0,04077 \cdot AA + 0,00000009933068 \cdot FH^2$	0,81

*Onde: k: número kappa; RD: rendimento depurado (%); AAR: álcali ativo residual (g.L⁻¹); AAC: álcali ativo consumido (kg.tsa⁻¹); TSS: teor de sólidos secos (t.tsa⁻¹); FH: fator H e AA: álcali ativo aplicado (%)

Tabela 24 – Análise estatística - parâmetros estimados pela análise de regressão para a espessura de 3,6 mm

3,6 mm	R²
$k = -33,77422 + 7483,11439 \cdot (1/FH) + 847,38093 \cdot (1/AA)$	0,94
$RD = 49,04228 + 0,02506 \cdot FH - 0,00001541 \cdot FH^2 - 0,01265 \cdot AA^2$	0,60
$AAR = -1,313 - 0,00299 \cdot FH + 0,04092 \cdot AA^2$	0,90
$AAC = 69,94099 + 8,67165 \cdot AA + 0,00001593 \cdot FH^2$	0,82
$TSS = 0,334 + 0,03882 \cdot AA + 0,00000005321083 \cdot FH^2$	0,70

*Onde: k: número kappa; RD: rendimento depurado (%); AAR: álcali ativo residual (g.L⁻¹); AAC: álcali ativo consumido (kg.tsa⁻¹); TSS: teor de sólidos secos (t.tsa⁻¹); FH: fator H e AA: álcali ativo aplicado (%)

Os valores estimados pelas equações são demonstrados na tabela 25.

Tabela 25 – Análise de regressão - parâmetros calculados visando à obtenção de número kappa 18

Espessura	RD	AAR	AAC	TSS	FH	AA
0,5 mm	52,64	12,97	274,23	1,18	466	21,2
1 mm	52,21	13,83	273,69	1,19	553	21,5
2 mm	53,05	14,71	275,40	1,17	461	21,5
3,6 mm	52,72	15,79	262,22	1,19	605	21,5

*As médias, na mesma coluna, seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, a um nível de 5% de probabilidade

**Onde: RD: rendimento depurado (%); AAR: álcali ativo residual (g.L⁻¹); AAC: álcali ativo consumido (kg.tsa⁻¹); TSS: teor de sólidos secos (t.tsa⁻¹); FH: fator H e AA: álcali ativo aplicado (%)

A tabela 25 demonstra o comportamento das espessuras para um número kappa 18. Pode-se observar que o rendimento para a espessura de 2 mm foi 1% superior às demais, além de gerar um teor de sólidos secos menor. Considerando-se a capacidade de produção de um digestor em uma fábrica convencional de 5100 adt/dia, teríamos uma redução de 102 toneladas de rejeitos por dia ao se utilizar essa espessura de cavaco.

Com relação ao álcali ativo residual, a espessura de 3,6 mm foi a que apresentou o maior resultado, indicando que o álcali ativo aplicado estimado pode ser reduzido. Já para o álcali ativo consumido, esta espessura apresentou o menor resultado, o que mostra que para se atingir um mesmo nível de rendimento ela necessita de menos reagentes, diferindo das demais.

Apesar dos resultados apontarem para uma possível semelhança entre as espessuras, é importante notar que para se atingir o mesmo número kappa é necessário um fator H de apenas 461 para a espessura de 2 mm contra um fator H de 605 para os cavacos de referência, o que representa uma diminuição do fator H na ordem de 24%, o que significa uma redução de 5,8 horas em 24 horas de processo para se produzir uma mesma quantidade de polpa celulósica. Desse modo, para a realização de cozimentos com aplicação de menores tempos, as espessuras de 0,5 e 2 mm seriam mais adequadas. No entanto, tendo em vista a produção desse tipo de cavaco e os gastos de energia envolvidos, a utilização da espessura de 2 mm contemplaria menores gastos e melhores resultados, uma vez que seria necessária mais energia para produção de cavacos de 0,5 mm.

Os ajustes matemáticos obtidos permitem a otimização do fator H e do álcali ativo em função do tipo de cozimento desejado, representando uma importante contribuição para futuros projetos.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos foi possível caracterizar os cavacos do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* para a produção de polpa celulósica e obter as bases para a realização de processos modificados com a utilização de menores tempos. Assim, conclui-se que:

- A densidade básica da madeira utilizada neste trabalho apresentou, em média, 0,437 g.cm³, estando um pouco abaixo dos valores encontrados na literatura, mas dentro da variação esperada, de 0,300 a 0,800 g.cm³ para madeira de *Eucalyptus spp*;

- O método de corte não apresentou qualquer influência nas características de densidade básica, morfologia das fibras e composição química da madeira. Somente a densidade a granel foi afetada pelas diferentes espessuras;

- Tanto as características físicas quanto morfológicas se encontram dentro dos padrões de referência da literatura, no entanto, verificou-se que o material em questão apresenta maiores porcentagens de extrativos;

- Com relação aos cozimentos, apesar dos resultados apontarem para uma possível semelhança entre as espessuras estudadas, é possível verificar que a espessura de 2 mm mesmo apresentando o menor número kappa apresentou os mesmos rendimentos que as demais espessuras, devendo-se optar pela utilização de cavacos de menores espessuras para a realização de cozimentos mais rápidos;

- Após a análise de regressão, verificou-se que espessura de 2 mm apresentou melhores rendimentos, menor teor de rejeitos e menor fator H;

- A espessura de 2 mm associada a um fator H de 461 e a um álcali ativo de 21,5% é mais adequada para realização de cozimentos com tempo reduzido; recomendando-se a utilização de cargas mais elevadas com a utilização de espessuras reduzidas;

- Os ajustes matemáticos obtidos permitem a otimização do fator H e da carga alcalina em função do tipo de cozimento desejado;

- A partir desse experimento, sugere-se a aplicação desta espessura em cozimentos modificados a fim de se verificar o comportamento desta em cozimentos que se utilizem da distribuição do álcali ativo, de modo a finalizar a criação de um novo processo e/ou a otimização dos processos já existentes.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F.S. **Influência do álcali ativo no processo de polpação *Lo-Solids* para madeiras de eucaliptos**. 2003. 115 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- ANDRADE, J.O.M.; ZVINAKEVICIUS, C.; FOELKEL, C.E.B. Estudos sobre a influência da espessura dos cavacos de eucalipto sobre a qualidade da celulose kraft correspondente. **O Papel**, São Paulo, v. 39, n. 10, p. 55-59, out.1978.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **Relatório anual**. São Paulo. 2012. 55 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- BARBOSA, L.C.A.; MALTHA, C.R.A.; CRUZ, M.P. Composição química de extrativos lipofílicos e polares de madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)**, Viçosa, v. 15, n. 2, p. 13 - 20, 2005.
- BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O. **A madeira das espécies de eucalipto como matéria-prima para a indústria de celulose e papel**. Brasília: PRODEPEF, 1976. 145 p. (Série Divulgação, 13).
- BASSA, A. **Processos de polpação kraft convencional e modificado com madeiras de *E. grandis* e híbrido (*E. grandis* x *E. urophylla*)**. 2002. 103 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- BASSA, A.G.M.C. **Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* para a produção de celulose Kraft através do Processo *Lo-Solids*™**. 2007. 170 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- BOX, G.E.P.; COX, D.R. An analysis of transformation. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, London, v. 26, n. 2, p. 211-252, 1964.
- BUSNARDO, C.A.; FOELKEL, C.E.B. Impregnação dos cavacos de *Eucalyptus urophylla* pelo licor alcalino kraft durante o cozimento: I. Penetração. In: CONGRESSO ANUAL DA ABCP, 12., 1979, São Paulo. **Trabalhos técnicos...** São Paulo: ABTCP, 1979. p. 75-82.
- CARVALHO, A.M.; NAHUIZ, M.A.R. Valorização da madeira do híbrido *Eucalyptus grandis* x *urophylla* através da produção conjunta de madeira serrada em pequenas dimensões, celulose e lenha. **Scientia Forestales**, Piracicaba, n. 59, p. 61-76, jun. 2001.

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. p. 367-381.

COSTA, J.A. **Qualidade da madeira de *Eucalyptus urograndis*, plantados no Distrito Federal, para a produção de celulose kraft.** 2011. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

COSTANZA, V.; COSTANZA, P. Estimating pure diffusion contributions in alkaline pulping processes. **Latin American Applied Research**, Bahia Blanca, v. 32, n. 2, p. 151-159, abr./jun. 2002.

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

CROY, T. **Kraft pulping of individual chip thickness fractions.** Disponível em: <<http://www.tappi.org/Downloads/unsorted/UNTITLED---pulp0085pdf.aspx>>. Acesso em: 18 out. 2012.

DANG, V.Q.; NGUYEN, K.L. A universal kinetic model for characterization of the effect of chip thickness on kraft pulping. **Bioresource Technology**, Clayton, v. 99, p. 1486-1490, 2008.

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.** 2007. 107 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

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

_____. Resíduos sólidos industriais da produção de celulose kraft de eucalipto. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, 2007. Disponível em: <http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT05_residuos.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2012.

_____. O processo de impregnação dos cavacos de madeira de eucalipto pelo licor Kraft de cozimento. **Eucalyptus Online Book & News**, 2009. Disponível em: <http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT15_ImpregnacaoCavacos.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2012.

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

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

GRACE, T.M.; LEOPOLD, B.; MALCON, E.W. Pulp and paper manufacture: alkaline pulping. **TAPPI**, Atlanta, v. 1, p. 15-22, 1989.

GULLICHSEN, J.; KOLEHMAINEN, H.; SUNDQVIST, H. On the nonuniformity of the kraft cook. **Paperi Ja Puu Paper and Timber**, Helsinki, v. 74, n. 6, p. 487-490, 1992.

GULLICHSEN, J.; SUNDQVIST, H.; KAUKAS, O.Y. On the importance of impregnation and chip dimensions on the homogeneity of kraft pulping. In: PULPING CONFERENCE, 1995, Chicago. **Proceedings...** p. 227-234.

GUSTAFSON, R.R.; JIMENEZ, G.; MCKEAN, W.T.; CHIAN, D.S. The role of penetration and diffusion in nonuniform pulping of softwood chips. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 72, n. 8, p. 163-167, Aug.1989.

HULTHOLM, T.; ROBERTSÉN, L.; LÖNNBERG, B.; KETTUNEN, A.; HENRICSON, K. Impregnation in alkaline pulping. In: PULPING CONFERENCE, 1997, Atlanta. **Proceedings...** 9 p.

IAWA COMMITTEE. IAWA list of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 10, n. 3, p. 219-332, 1989.

INGRUBER, O.V.; KOCUREK, M.J.; WONG, A. (Ed.). **Pulp and paper manufacture** 3rd ed. Montreal: Canadian Pulp and Association, 1985. v. 4, 352 p.

JOHANSEN, D.A. **Plant microtechnique**. New York: MacGraw-Hill, 1940. 533 p.

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

KROTSCHKEK, A.W. Pulping technology and equipment. In: HEBERT SIXTA. **Handbook of pulp**. Lenzing: WILEY-VCH Verlag Gmb H & Co, 2006. chap. 4, p. 367-392.

LOMBARDO, C.; PADILLA, A. **Manual teórico practico de conversion química de la madeira y química ambiental**. Mérida: Universidad de Los Andes, Facultad de Ciências Forestales y Ambientales, 1988. 55 p.

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

LUU, N.H.; SHARIFF, A. Defining optimum chip size for a market softwood kraft mill using an empirical model developed from layered cooking of chips. **Pulp and Paper Canada**, Westmount, v. 104, n. 12, p. 69-73, 2003.

MACLEOD, M.; DORT, A.; YOUNG, J.; SMITH, D.; KREFT, K.; TREMBLAY, M.-A.; BESSETE, P.-A. Crushing: Is this any way to treat overthick softwood chips for kraft pulping? **Pulp and Paper Canada**, Westmount, v. 106, n. 2, p. 44-51, 2005.

MIYANISHI, T.; SHIMADA, H. Aumento da resistência e do rendimento da celulose mediante simulação de cozimento *Lo-Solids* de kraft por computador. **O Papel**, São Paulo, v. 62, n. 12, p. 25-39, dez. 2001.

MOKFIENSKI, A. **Importância relativa da densidade básica e da constituição química da madeira de *Eucalyptus spp.* no rendimento, branqueabilidade e qualidade da polpa kraft**. 2004. 153 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade de Viçosa, Minas Gerais, 2004.

PIMENTA, M.T.B. **Utilização de fluídos no estado sub/supercrítico na polpação de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda***. 2005. 215 p. Tese (Doutorado em Ciências Físico-Química) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

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. Blake1. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 901-909, 2004.

REKUNEN, S.; JUTILA, E.; LÖNNBERG, B.; VIRKOLA, N.E. Examination of reaction kinetics in kraft cooking. **Paperi Ja Puu**, Helsinki, v. 62, n. 2, p. 80-90, 1980.

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

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. 160 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

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

SHIMOYAMA, V.R.S.; BARRICHELO, L.E.G. Influência das características anatômicas e químicas sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus* sp. In: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP, 24., 1991, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1991. p. 23-36.

SILVA JÚNIOR, F.G. **Polpação kraft do eucalipto com adição de antraquinona, polissulfetos e surfactante**. 1997. 184 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

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

SILVA JÚNIOR, F.G.; MUNER, J.C.G.; VALLE, C.F. Programa de qualidade da madeira da Votorantim Celulose e Papel. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 28., 1995, São Paulo. **Trabalhos apresentados...** São Paulo: ABTCP, 1995. p. 515-529.

SMOOK, G. **Handbook for pulp and paper technologies**. 3rd ed. Vancouver: Angus Wilde Publ., 2002. 419 p.

TECHICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI test methods**: 1998-1999. Atlanta, 1999. 1 CD-ROM.

TIKKA, P.; TAHKANEN, H.; KOVASIN, K. Chip thickness vs kraft pulping performance. Part I: experiments by multiple hanging baskets in batch digestors. In: PULPING CONFERENCE, 1992, Boston. **Proceedings...** p. 555-560.

TOMAZELLO FILHO, M. **Efeito da irrigação e fertilização nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla***. 2006. 135 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

TURNER JR., E.A.; STROMBERG, B. Maior rendimento da polpação de fibra curta pelo processo *Lo-Solids*. **O Papel**, São Paulo, v. 60, n. 1, p. 52-55, jan.1999.

VALVERDE, S.R., SOARES, N.S.; SILVA, M.L. Desempenho das exportações brasileiras de celulose. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 1017-1023, 2006.

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

WANG, Z.; GULLICHSEN, J. **New chipping technique for kraft pulping**. Disponível em: <<http://www.tappi.org/Downloads/ConferencePapers/1998/YIE98/yie9837.aspx>>. Acesso em: 19 out. 2012.

APÊNDICES

Apêndice A – Metodologia aplicada para obtenção dos teores de extrativo, lignina solúvel, insolúvel e holocelulose

A partir dos cavacos homogeneizados foi obtida uma sub-amostra sendo esta processada em moinho de facas visando à obtenção de material para as determinações químicas.

Para determinação do teor de extrativos totais foi pesado o equivalente a 1g absolutamente seco (a.s.) de serragem, a qual foi transferida para um saquinho de papel filtro. As amostras foram colocadas no corpo do extrator e extraídas com álcool:tolueno (1:2) durante 8 horas e em seguidas foram secas ao ar. Após secas, as amostras foram extraídas em álcool 96° GL durante 8 horas e novamente secas ao ar.

As amostras foram transferidas para um Erlenmeyer de 250 mL com 100 mL de água destilada, o qual permaneceu em banho-maria por 3 horas à temperatura de ebulição, com agitação suave a cada 15 min. A solução com a serragem foi então filtrada em cadinho de vidro sinterizado tarado e lavada com 250 mL de água quente. Os cadinhos permaneceram em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até peso constante e foram pesados.

O cálculo do teor de “extrativos totais” foi realizado através da fórmula:

$$\text{E.T.(\%)} = (1 - \text{massa a. s. serragem}) * 100$$

Onde:

Massa a.s. serragem: massa de serragem seca (g).

Para determinação do teor de lignina klason foram pesados 300mg da serragem livre de extrativos seca e transferidas para Erlenmeyer de 250 mL. Foram adicionado 3 mL de H_2SO_4 72% (resfriado a $10 - 12^\circ\text{C}$) e este permaneceu em banho-maria a $30 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 1 hora, com agitação constante. Depois de retirado do banho-maria foram adicionados 84 mL de água destilada quente. O Erlenmeyer foi levado pra autoclave a 118°C (27psi) durante 60 minutos. A solução foi filtrada através de cadinho sinterizado tarado com um fundo com papel de filtro. A serragem foi então lavada com 700 mL de água quente e os cadinhos foram levados à estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até peso constante e posteriormente pesados.

O Cálculo do teor de lignina residual (L.R.) foi realizado através da fórmula:

$$L. R. (\%) = \left(\frac{\text{Massa a. s. final}}{\frac{0,3}{1 - \frac{E. T.}{100}}} \right) \times 100$$

Onde:

Massa a.s. final: massa de lignina seca (g).

Para o cálculo de lignina solúvel e total o líquido obtido após a filtragem da solução foi transferido para um balão volumétrico de 1000 mL completando-se o volume com água destilada. Uma prova em branco foi preparada diluindo-se 3 mL de ácido sulfúrico 72% para 1000 mL. Utilizando cubeta de quartzo e a prova em branco, o espectrofotômetro foi ajustado em 0 de absorbância no comprimento de onda 215nm e 280nm e a leitura dos filtrados foi realizada.

O Cálculo dos teores de lignina solúvel (L.S.) e lignina total (L.T.) foram realizados através das fórmulas:

$$L. S. (\%) = \left(\frac{4,25 \times L_{215} - L_{280}}{300 \times \left(\frac{0,3}{1 - \frac{E. T.}{100}} \right)} \right) \times 100$$

$$L. T. (\%) = L. R. (\%) + L. S. (\%)$$

O teor de holocelulose foi determinado por diferença através da fórmula:

$$100 - (\% \text{ extrativos totais} + \% \text{ lignina}).$$

Apêndice B - Teste de Tukey para densidade básica e densidade aparente

Tabela 26 – Resultado do teste de Tukey para densidade aparente

Tabela da Anova	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	0,017657975	0,005885992	883,3604	2,0161E-10
Resíduos	8	5,33055E-05	6,66318E-06		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	0,043922077	0,037172691	0,050671464	1,10481E-07
2-0.5	0,073414525	0,066665139	0,080163911	4,60839E-09
3,6-0.5	0,103985851	0,097236465	0,110735238	1,57526E-10
2-1	0,029492448	0,022743061	0,036241834	3,16061E-06
3,6-1	0,060063774	0,053314388	0,06681316	1,39396E-08
3,6-2	0,030571326	0,02382194	0,037320713	2,40741E-06

*Os valores de P menor que 0,05 indicam que existe diferença entre as médias

Tabela 27 – Resultado do teste de Tukey para densidade básica

Tabela da Anova	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	0,000344153	0,000114718	3,619899	0,064675
Resíduos	8	0,000253527	3,16909E-05		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	0,004712442	-0,010006975	0,019431858	0,740324655
2-0.5	0,010679273	-0,004040144	0,02539869	0,171531299
3,6-0.5	0,013881352	-0,000838064	0,028600769	0,064659198
2-1	0,005966832	-0,008752585	0,020686248	0,588766112
3,6-1	0,009168911	-0,005550506	0,023888328	0,265837549
3,6-2	0,003202079	-0,011517338	0,017921496	0,895566312

*Os valores de P menor que 0,05 indicam que existe diferença entre as médias

Apêndice C – Teste de Tukey para dimensões das fibras

Tabela 28 – Resultado do teste de Tukey para o comprimento das fibras

Tabela da Anova	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	0,013320736	0,004440245	0,75069	0,5224518
Resíduos	39				
	6	2,342280361	0,005914849		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	0,011143189	-0,016917734	0,039204112	0,735171527
2-0.5	0,015900256	-0,012160667	0,043961179	0,461636498
3,6-0.5	0,009054433	-0,01900649	0,037115356	0,839006258
2-1	0,004757067	-0,023303856	0,03281799	0,971975132
3,6-1	-0,002088756	-0,030149679	0,025972167	0,997486457
3,6-2	-0,006845823	-0,034906746	0,0212151	0,92255246

*Os valores de P menor que 0,05 indicam que existe diferença entre as médias

Tabela 29 – Resultado do teste de Tukey para a largura das fibras

Tabela da Anova	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	11,69704691	3,899015637	1,03815	0,3755411
Resíduos	39				
	6	1487,265729	3,755721538		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-0,3117093	-1,018802718	0,395384118	0,666633909
2-0.5	0,0286312	-0,678462218	0,735724618	0,999591427
3,6-0.5	0,152485	-0,554608418	0,859578418	0,944781725
2-1	0,3403405	-0,366752918	1,047433918	0,600607924
3,6-1	0,4641943	-0,242899118	1,171287718	0,328336829
3,6-2	0,1238538	-0,583239618	0,830947218	0,969235943

*Os valores de P menor que 0,05 indicam que existe diferença entre as médias

Tabela 30 – Resultado do teste de Tukey para diâmetro do lume das fibras

Tabela da Anova	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	12,95318946	4,317729822	1,4327	0,232735
	39				
Resíduos	6	1193,408419	3,013657625		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-0,32053358	-0,95393212	0,31286496	0,559881232
2-0.5	-0,23644317	-0,86984171	0,39695537	0,770497307
3,6-0.5	0,12907366	-0,50432488	0,7624722	0,952835081
2-1	0,08409041	-0,54930813	0,71748895	0,986163613
3,6-1	0,44960724	-0,1837913	1,08300578	0,260135097
3,6-2	0,36551683	-0,26788171	0,99891537	0,445201785

*Os valores de P menor que 0,05 indicam que existe diferença entre as médias

Tabela 31 – Resultado do teste de Tukey para a parede celular das fibras

Tabela da Anova	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	1,219801821	0,406600607	1,5742471	0,195070
	39				
Resíduos	6	102,2799004	0,258282577		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	0,00441214	-0,181016861	0,189841141	0,999916868
2-0.5	0,132537185	-0,052891816	0,317966186	0,254312948
3,6-0.5	0,01170567	-0,173723331	0,197134671	0,998460855
2-1	0,128125045	-0,057303956	0,313554046	0,283190542
3,6-1	0,00729353	-0,178135471	0,192722531	0,999625404
3,6-2	-0,120831515	-0,306260516	0,064597486	0,334985161

*Os valores de P menor que 0,05 indicam que existe diferença entre as médias

Apêndice D – Teste de Tukey para a composição química

Tabela 32 – Resultado do teste de Tukey para a porcentagem de extrativos

Tabela da Anova	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	0,102691667	0,034230556	1,14964	0,38659832
Resíduos	8	0,2382	0,029775		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	0,146666667	-0,59784613	0,304512797	0,73180047
2-0.5	0,253333333	-0,704512797	0,19784613	0,34047993
3,6-0.5	0,183333333	-0,634512797	0,26784613	0,58703894
2-1	0,106666667	-0,55784613	0,344512797	0,87126673
3,6-1	0,036666667	-0,48784613	0,414512797	0,99333129
3,6-2	0,07	-0,381179464	0,521179464	0,95755957

*Os valores de P menor que 0,05 indicam que existe diferença entre as médias

Tabela 33 – Resultado do teste de Tukey para a porcentagem de lignina insolúvel

Tabela da Anova	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	0,276124888	0,092041629	0,13526	0,93623689
Resíduos	8	5,44379121	0,680473901		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	0,320373105	-1,836522747	2,477268957	0,96238222
2-0.5	0,405161604	-1,751734248	2,562057456	0,928741635
3,6-0.5	0,272691812	-1,884204039	2,429587664	0,976077222
2-1	0,084788499	-2,072107353	2,241684351	0,999224987
3,6-1	-0,047681292	-2,204577144	2,10921456	0,9998614
3,6-2	-0,132469791	-2,289365643	2,024426061	0,997078767

*Os valores de P menor que 0,05 indicam que existe diferença entre as médias

Tabela 34 – Resultado do teste de Tukey para a porcentagem de lignina solúvel

Tabela da Anova	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	0,134835512	0,044945171	0,697440	0,5793017
Resíduos	8	0,515544117	0,064443015		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-0,13262037	-0,796380807	0,531140067	0,916160845
2-0.5	-0,296592593	-0,96035303	0,367167844	0,516297801
3,6-0.5	-0,175685185	-0,839445622	0,488075252	0,830770923
2-1	-0,163972222	-0,827732659	0,499788215	0,856596974
3,6-1	-0,043064815	-0,706825252	0,620695622	0,996564092
3,6-2	0,120907407	-0,54285303	0,784667844	0,934348998

*Os valores de P menor que 0,05 indicam que existe diferença entre as médias

Tabela 35 – Resultado do teste de Tukey para a porcentagem de lignina total

Tabela da Anova	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	0,053315409	0,017771803	0,0519650	0,9832461
Resíduos	8	2,735963945	0,341995493		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	0,187752734	-1,341339315	1,716844784	0,977983301
2-0.5	0,108569011	-1,420523038	1,63766106	0,995516323
3,6-0.5	0,097006627	-1,432085422	1,626098677	0,996784627
2-1	-0,07918372	-1,608275772	1,449908326	0,998238854
3,6-1	-0,09074610	-1,619838156	1,438345942	0,997360901
3,6-2	-0,01156238	-1,540654433	1,517529665	0,99999444

*Os valores de P menor que 0,05 indicam que existe diferença entre as médias

Tabela 36 – Resultado do teste de Tukey para a porcentagem de holocelulose

Tabela da Anova	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	0,063214809	0,021071603	0,0648217	0,9770163
Resíduos	8	2,600560573	0,325070072		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-0,041086068	-1,531860488	1,449688353	0,999731816
2-0.5	0,144764322	-1,346010098	1,635538742	0,988788749
3,6-0.5	0,086326706	-1,404447714	1,577101126	0,997546101
2-1	0,18585039	-1,30492403	1,67662481	0,977011156
3,6-1	0,127412774	-1,363361647	1,618187194	0,992271487
3,6-2	-0,058437616	-1,549212036	1,432336804	0,999231494

*Os valores de P menor que 0,05 indicam que existe diferença entre as médias

Apêndice E – Transformação Box-Cox das variáveis número kappa e álcali ativo residual

Box-Cox Transformation Information for K				
Lambda		R-Square	Log Like	
-3.00		0.97	-48.049	
-2.75		0.97	-38.991	
-2.50		0.97	-30.296	
-2.25		0.98	-22.003	
-2.00		0.98	-14.161	
-1.75		0.98	-6.829	
-1.50		0.98	-0.076	
-1.25		0.98	6.016	
-1.00		0.98	11.347	
-0.75		0.99	15.798	
-0.50		0.99	19.228	
-0.25		0.99	21.470	*
0.00	+	0.99	22.336	<
0.25		0.99	21.613	*
0.50		0.99	19.075	
0.75		0.99	14.497	
1.00		0.99	7.673	
1.25		0.99	-1.556	
1.50		0.99	-13.282	
1.75		0.99	-27.515	
2.00		0.99	-44.175	
2.25		0.99	-63.109	
2.50		0.99	-84.109	
2.75		0.99	-106.935	
3.00		0.99	-131.345	
< - Best Lambda * - 95% Confidence Interval + - Convenient Lambda				

Box-Cox Transformation Information for AAR				
Lambda		R-Square	Log Like	
-3.00		0.94	-156.762	
-2.75		0.94	-136.333	
-2.50		0.94	-116.706	
-2.25		0.94	-97.985	
-2.00		0.95	-80.296	
-1.75		0.95	-63.790	
-1.50		0.95	-48.642	
-1.25		0.95	-35.045	
-1.00		0.95	-23.205	
-0.75		0.95	-13.322	
-0.50		0.95	-5.572	
-0.25		0.95	-0.084	
0.00	+	0.95	3.073	*
0.25		0.95	3.909	<
0.50		0.95	2.502	*
0.75		0.94	-1.008	
1.00		0.94	-6.440	
1.25		0.94	-13.594	
1.50		0.93	-22.265	
1.75		0.93	-32.258	
2.00		0.92	-43.397	
2.25		0.91	-55.525	
2.50		0.91	-68.506	
2.75		0.90	-82.224	
3.00		0.89	-96.582	
< - Best Lambda * - 95% Confidence Interval + - Convenient Lambda				

Apêndice F – Análise de variância (ANOVA) dos diferentes parâmetros para as diferentes espessuras

Tabela 37 – ANOVA para o número kappa para a espessura de 0,5 mm

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	4173.445497	379.404136	429.10	<.0001
Error	24	21.220667	0.884194		
Corrected Total	35	4194.666164			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	897.072072	448.536036	507.28	<.0001
CA	3	2434.461808	811.487269	917.77	<.0001
FH*CA	6	841.911617	140.318603	158.70	<.0001

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias.

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo

Tabela 38 – ANOVA para o número kappa para a espessura de 1 mm

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	3173.021233	288.456476	328.57	<.0001
Error	24	21.069867	0.877911		
Corrected Total	35	3194.091100			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	918.127017	459.063508	522.90	<.0001
CA	3	1593.387656	531.129219	604.99	<.0001
FH*CA	6	661.506561	110.251094	125.58	<.0001

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo

Tabela 39 – ANOVA para o número kappa para a espessura de 2 mm

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	1572.505408	142.955037	226.20	<.0001
Error	24	15.167467	0.631978		
Corrected Total	35	1587.672875			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	434.0746500	217.0373250	343.43	<.0001
CA	3	955.6981639	318.5660546	504.08	<.0001
FH*CA	6	182.7325944	30.4554324	48.19	<.0001

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo

Tabela 40 – ANOVA para o número kappa para os cavacos de referência

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	1967.749256	178.886296	148.88	<.0001
Error	24	28.837133	1.201547		
Corrected Total	35	1996.586389			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	724.236339	362.118169	301.38	<.0001
CA	3	1202.551856	400.850619	333.61	<.0001
FH*CA	6	40.961061	6.829844	5.68	0.0009

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo

Tabela 41 – ANOVA para o rendimento depurado para a espessura de 0,5 mm

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	130.2766667	11.84333333	7.24	<.0001
Error	24	39.23333333	1.6347222		
Corrected Total	35	169.5100000			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	58.68666667	29.34333333	17.95	<.0001
CA	3	55.45444444	18.48481481	11.31	<.0001
FH*CA	6	16.13555556	2.68925926	1.65	0.1782

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo

Tabela 42 – ANOVA para o rendimento depurado para a espessura de 1 mm

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	171.3963889	15.5814899	16.42	<.0001
Error	24	22.77333333	0.9488889		
Corrected Total	35	194.1697222			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	57.04222222	28.52111111	30.06	<.0001
CA	3	106.3875000	35.4625000	37.37	<.0001
FH*CA	6	7.96666667	1.3277778	1.40	0.2555

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo

Tabela 43 – ANOVA para o rendimento depurado para a espessura de 2 mm

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	183.2822222	16.6620202	10.30	<.0001
Error	24	38.8400000	1.6183333		
Corrected Total	35	222.1222222			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	78.22722222	39.11361111	24.17	<.0001
CA	3	76.89555556	25.63185185	15.84	<.0001
FH*CA	6	28.15944444	4.69324074	2.90	0.0286

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo

Tabela 44 – ANOVA para o rendimento depurado para os cavacos de referência

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	99.4075000	9.0370455	4.14	0.0018
Error	24	52.4000000	2.1833333		
Corrected Total	35	151.8075000			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	51.78166667	25.89083333	11.86	0.0003
CA	3	41.92305556	13.97435185	6.40	0.0024
FH*CA	6	5.70277778	0.95046296	0.44	0.8479

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo

Tabela 45 – ANOVA para o álcali ativo residual para a espessura de 0,5 mm

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	388.1950556	35.2904596	61.15	<.0001
Error	24	13.8512000	0.5771333		
Corrected Total	35	402.0462556			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	17.0533556	8.5266778	14.77	<.0001
CA	3	368.8123000	122.9374333	213.01	<.0001
FH*CA	6	2.3294000	0.3882333	0.67	0.6727

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo

Tabela 46 – ANOVA para o álcali ativo residual para a espessura de 1 mm

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	341.6363889	31.0578535	27.52	<.0001
Error	24	27.0866667	1.1286111		
Corrected Total	35	368.7230556			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	6.4238889	3.2119444	2.85	0.0778
CA	3	330.1097222	110.0365741	97.50	<.0001
FH*CA	6	5.1027778	0.8504630	0.75	0.6129

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo

Tabela 47 – ANOVA para o álcali ativo residual para a espessura de 2 mm

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	373.1188889	33.9198990	27.03	<.0001
Error	24	30.1200000	1.2550000		
Corrected Total	35	403.2388889			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	10.3438889	5.1719444	4.12	0.0289
CA	3	357.4900000	119.1633333	94.95	<.0001
FH*CA	6	5.2850000	0.8808333	0.70	0.6509

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo

Tabela 48 – ANOVA para o álcali ativo residual para os cavacos de referência

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	461.1043639	41.9185785	29.65	<.0001
Error	24	33.9251333	1.4135472		
Corrected Total	35	495.0294972			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	33.8201722	16.9100861	11.96	0.0002
CA	3	415.0965639	138.3655213	97.89	<.0001
FH*CA	6	12.1876278	2.0312713	1.44	0.2419

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo

Tabela 49 – ANOVA para o álcali ativo consumido para a espessura de 0,5 mm

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	21295.17812	1935.92528	28.57	<.0001
Error	24	1626.14173	67.75591		
Corrected Total	35	22921.31985			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	3265.37924	1632.68962	24.10	<.0001
CA	3	17544.05582	5848.01861	86.31	<.0001
FH*CA	6	485.74306	80.95718	1.19	0.3426

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo

Tabela 50 – ANOVA para o álcali ativo consumido para a espessura de 1 mm

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	25302.18225	2300.19839	30.30	<.0001
Error	24	1821.76918	75.90705		
Corrected Total	35	27123.95143			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	3135.24802	1567.62401	20.65	<.0001
CA	3	21930.78505	7310.26168	96.31	<.0001
FH*CA	6	236.14918	39.35820	0.52	0.7885

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo

Tabela 51 – ANOVA para o álcali ativo consumido para a espessura de 2 mm

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	24294.62085	2208.60190	28.04	<.0001
Error	24	1890.25597	78.76067		
Corrected Total	35	26184.87682			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	1942.67021	971.33510	12.33	0.0002
CA	3	21205.45517	7068.48506	89.75	<.0001
FH*CA	6	1146.49548	191.08258	2.43	0.0563

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo

Tabela 52 – ANOVA para o álcali ativo consumido para os cavacos de referência

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	17486.39666	1589.67242	15.90	<.0001
Error	24	2399.16099	99.96504		
Corrected Total	35	19885.55766			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	3316.92303	1658.46151	16.59	<.0001
CA	3	13540.58424	4513.52808	45.15	<.0001
FH*CA	6	628.88940	104.81490	1.05	0.4196

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo

Tabela 53 – ANOVA para o teor de sólidos secos para a espessura de 0,5 mm

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	0.36934067	0.03357642	14.55	<.0001
Error	24	0.05537197	0.00230717		
Corrected Total	35	0.42471264			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	0.08744797	0.04372398	18.95	<.0001
CA	3	0.25971999	0.08657333	37.52	<.0001
FH*CA	6	0.02217271	0.00369545	1.60	0.1899

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo

Tabela 54 – ANOVA para o teor de sólidos secos para a espessura de 1 mm

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	0.44337028	0.04030639	32.31	<.0001
Error	24	0.02994057	0.00124752		
Corrected Total	35	0.47331085			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	0.07890502	0.03945251	31.62	<.0001
CA	3	0.35759601	0.11919867	95.55	<.0001
FH*CA	6	0.00686925	0.00114487	0.92	0.4994

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo

Tabela 55 – ANOVA para o teor de sólidos secos para a espessura de 2 mm

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	0.44447280	0.04040662	16.84	<.0001
Error	24	0.05757475	0.00239895		
Corrected Total	35	0.50204756			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	0.11014326	0.05507163	22.96	<.0001
CA	3	0.30012834	0.10004278	41.70	<.0001
FH*CA	6	0.03420121	0.00570020	2.38	0.0606

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias.

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo.

Tabela 56 – ANOVA para o teor de sólidos secos para os cavacos de referência

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	0.35794130	0.03254012	10.19	<.0001
Error	24	0.07664002	0.00319333		
Corrected Total	35	0.43458132			

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FH	2	0.07760022	0.03880011	12.15	0.0002
CA	3	0.27295198	0.09098399	28.49	<.0001
FH*CA	6	0.00738909	0.00123151	0.39	0.8809

*Os valores de F menor que 0,05 indicam que existe diferença estatística entre as médias.

**Onde FH = fator H e CA = Álcali ativo

Apêndice G – Teste de Tukey para o número kappa com relação ao álcali ativo para as diferentes espessuras

Tabela 57 – Teste de Tukey para a espessura de 0,5 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	CA
A	36.0333	9	15.5
B	21.6200	9	17.5
C	16.5822	9	19.5
D	15.3167	9	21.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 58 – Teste de Tukey para a espessura de 1 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	CA
A	33.1756	9	15.5
B	19.7944	9	17.5
C	17.7367	9	19.5
C	16.5933	9	21.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 59 – Teste de Tukey para a espessura de 2 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	CA
A	28.8878	9	15.5
B	19.8600	9	17.5
C	16.8922	9	19.5
D	15.7567	9	21.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 60 – Teste de Tukey para os cavacos de referência

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	CA
A	32.3622	9	15.5
B	23.8311	9	17.5
C	19.7800	9	19.5
D	17.0689	9	21.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 61 – Teste de Tukey para a carga de 15,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	233,5978	77,86592	0,70242	0,55757
Resíduos	32	3547,309	110,8534		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-2,85778	-16,3051	10,58953	0,938606
2-0.5	-7,14556	-20,5929	6,301749	0,484753
3.6-0.5	-3,67111	-17,1184	9,776193	0,880339
2-1	-4,28778	-17,7351	9,159527	0,823257
3.6-1	-0,81333	-14,2606	12,63397	0,9984
3.6-2	3,474444	-9,97286	16,92175	0,896299

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 62 – Teste de Tukey para a carga de 17,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	97,62292	32,54097	1,30766	0,2889
Resíduos	32	796,3119	24,88475		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-1,8255	-8,19685	4,545734	0,86457
2-0.5	-1,76	-8,13129	4,61129	0,87664
3.6-0.5	2,21111	-4,16018	8,582401	0,78353
2-1	0,06555	-6,30573	6,436845	0,99999
3.6-1	4,03666	-2,33462	10,40796	0,33200
3.6-2	3,97111	-2,40018	10,3424	0,34607

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 63 – Teste de Tukey para a carga de 19,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	55,98491	18,66164	2,4036	0,08574
Resíduos	32	248,4483	7,76401		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	1,15444	-2,40436	4,713246	0,8157
2-0.5	0,31	-3,2488	3,868801	0,9952
3.6-0.5	3,19777	-0,36102	6,756579	0,0907
2-1	-0,8444	-4,40325	2,714357	0,9172
3.6-1	2,04333	-1,51547	5,602135	0,4175
3.6-2	2,88777	-0,67102	6,446579	0,1453

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 64 – Teste de Tukey para a carga de 21,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	16,96917	5,656389	0,9289	0,43801
Resíduos	32	194,8479	6,088997		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	1,27666	-1,87495	4,428285	0,6935
2-0.5	0,44	-2,71162	3,591618	0,9812
3.6-0.5	1,75222	-1,3994	4,90384	0,4456
2-1	-0,8366	-3,98828	2,314951	0,8886
3.6-1	0,47555	-2,67606	3,627174	0,9765
3.6-2	1,31222	-1,8394	4,46384	0,6752

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Apêndice H – Teste de Tukey para o número kappa com relação ao fator H para as diferentes espessuras

Tabela 65 – Teste de Tukey para a espessura de 0,5 mm.

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	FH
A	28.8150	12	451
B	21.7042	12	829
C	16.6450	12	1244

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 66 – Teste de Tukey para a espessura de 1 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	FH
A	28.4875	12	451
B	20.7217	12	829
C	16.2658	12	1244

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 67 – Teste de Tukey para a espessura de 2 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	FH
A	24.9842	12	451
B	19.4367	12	829
C	16.6267	12	1244

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 68 – Teste de Tukey para os cavacos de referência

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	FH
A	29.5292	12	451
B	20.9658	12	829
C	19.2867	12	1244

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 69 – Teste de Tukey para o fator H de 451 entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	147,924	49,30801	0,38714	0,76279
Resíduos	44	5604,024	127,3642		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-0,3275	-12,6291	11,97406	0,99986
2-0.5	-3,8308	-16,1324	8,470727	0,83922
3.6-0.5	0,71416	-11,5874	13,01573	0,99865
2-1	-3,5033	-15,8049	8,798227	0,87171
3.6-1	1,04166	-11,2599	13,34323	0,99586
3.6-2	4,545	-7,75656	16,84656	0,75783

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 70 – Teste de Tukey para o fator H de 829 entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	32,10358	10,70119	0,25697	0,8559
Resíduos	44	1832,306	41,64332		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-0,9825	-8,01661	6,051611	0,982074
2-0.5	-2,2675	-9,30161	4,766611	0,82491
3.6-0.5	-0,7383	-7,77244	6,295778	0,992208
2-1	-1,285	-8,31911	5,749111	0,961421
3.6-1	0,24416	-6,78994	7,278278	0,99971
3.6-2	1,52916	-5,50494	8,563278	0,937439

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 71 – Teste de Tukey para o fator H de 1244 entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	70,36122	23,45374	1,8324	0,15519
Resíduos	44	563,1765	12,79947		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-0,37917	-4,27888	3,520545	0,9937
2-0.5	-0,01833	-3,91804	3,881378	0,9999
3.6-0.5	2,641667	-1,25804	6,541378	0,2830
2-1	0,360833	-3,53888	4,260545	0,9946
3.6-1	3,02083	-0,87888	6,920545	0,1794
3.6-2	2,66	-1,23971	6,559712	0,2772

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si.

Apêndice I – Teste de Tukey para o rendimento depurado com relação ao álcali ativo para as diferentes espessuras

Tabela 72 – Teste de Tukey para a espessura de 0,5 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	CA
A	54.5222	9	15.5
B	52.4556	9	17.5
B	52.1111	9	19.5
B	51.1111	9	21.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 73 – Teste de Tukey para a espessura de 1 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	CA
A	55.9000	9	15.5
B	53.1000	9	17.5
C	52.3333	9	19.5
C	51.2556	9	21.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 74 – Teste de Tukey para a espessura de 2 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	CA
A	55.2556	9	15.5
B	53.4444	9	17.5
C	52.5556	9	19.5
C	51.2333	9	21.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 75 – Teste de Tukey para os cavacos de referência

Means with the same letter are not significantly different.				
Tukey Grouping		Mean	N	CA
	A	54.4000	9	15.5
	A	54.1111	9	17.5
B	A	52.5000	9	19.5
B		51.8222	9	21.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 76 – Teste de Tukey para a carga de 15,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	13,15861	4,386204	0,6258	0,60358
Resíduos	32	224,2778	7,008681		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	1,37777	-2,00348	4,75904	0,68970
2-0.5	0,73333	-2,64793	4,114596	0,93509
3.6-0.5	-0,1222	-3,50348	3,25904	0,99965
2-1	-0,6444	-4,02571	2,736818	0,95456
3.6-1	-1,5	-4,88126	1,881262	0,63011
3.6-2	-0,8555	-4,23682	2,525707	0,90184

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 77 – Teste de Tukey para a carga de 17,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	12,86889	4,28963	1,36921	0,26983
Resíduos	32	100,2533	3,132917		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	0,64444	-1,61622	2,905104	0,86631
2-0.5	0,98888	-1,27177	3,249548	0,64041
3.6-0.5	1,65555	-0,6051	3,916215	0,21505
2-1	0,34444	-1,91622	2,605104	0,97587
3.6-1	1,01111	-1,24955	3,271771	0,62404
3.6-2	0,66666	-1,59399	2,927326	0,85435

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 78 – Teste de Tukey para a carga de 19,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	1,076389	0,358796	0,14717	0,9307
Resíduos	32	78,01111	2,437847		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	0,22222	-1,77196	2,2164	0,99025
2-0.5	0,44444	-1,54973	2,438623	0,93010
3.6-0.5	0,38888	-1,60529	2,383067	0,95156
2-1	0,22222	-1,77196	2,2164	0,99025
3.6-1	0,16666	-1,82751	2,160845	0,99582
3.6-2	-0,0555	-2,04973	1,938623	0,99984

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 79 – Teste de Tukey para a carga de 21,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	2,722222	0,907407	0,53370	0,6624
Resíduos	32	54,40667	1,700208		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	0,14444	-1,52093	1,809819	0,99533
2-0.5	0,12222	-1,54315	1,787596	0,99715
3.6-0.5	0,71111	-0,95426	2,376485	0,65770
2-1	-0,02222	-1,6876	1,643152	0,99998
3.6-1	0,56666	-1,09871	2,232041	0,79337
3.6-2	0,58888	-1,07649	2,254263	0,77385

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Apêndice J – Teste de Tukey para o rendimento depurado com relação ao fator H para as diferentes espessuras

Tabela 80 – Teste de Tukey para a espessura de 0,5 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	FH
A	54.0333	12	451
B	52.7000	12	829
C	50.9167	12	1244

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 81 – Teste de Tukey para a espessura de 1 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	FH
A	54.5417	12	451
B	53.4083	12	829
C	51.4917	12	1244

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 82 – Teste de Tukey para a espessura de 2 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	FH
A	54.8417	12	451
B	53.2833	12	829
C	51.2417	12	1244

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 83 – Teste de Tukey para os cavacos de referência

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	FH
A	54.8333	12	829
B	52.8167	12	451
B	51.9750	12	1244

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 84 – Teste de Tukey para o fator H de 451 entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	28,675	9,558333	1,71462	0,17782
Resíduos	44	245,2817	5,574583		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	0,5083	-2,06528	3,081943	0,95199
2-0.5	0,8083	-1,76528	3,381943	0,83577
3.6-0.5	-1,2166	-3,79028	1,356943	0,59137
2-1	0,3	-2,27361	2,87361	0,98940
3.6-1	-1,725	-4,29861	0,84861	0,29189
3.6-2	-2,025	-4,59861	0,54861	0,16877

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 85 – Teste de Tukey para o fator H de 829 entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	29,52562	9,841875	2,8528	0,0479
Resíduos	44	151,7925	3,44983		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	0,7083	-1,31625	2,732915	0,7867
2-0.5	0,583	-1,44125	2,607915	0,8678
3.6-0.5	2,1333	0,108751	4,157915	0,0354
2-1	-0,125	-2,14958	1,899582	0,9983
3.6-1	1,425	-0,59958	3,449582	0,2516
3.6-2	1,55	-0,47458	3,574582	0,1877

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 86 – Teste de Tukey para o fator H de 1244 entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	7,170625	2,390208	1,109	0,35547
Resíduos	44	94,7975	2,154489		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	0,575	-1,02496	2,174958	0,772
2-0.5	0,325	-1,27496	1,924958	0,948
3.6-0.5	1,05833	-0,54162	2,658292	0,303
2-1	-0,25	-1,84996	1,349958	0,975
3.6-1	0,48333	-1,11662	2,083292	0,850
3.6-2	0,73333	-0,86662	2,333292	0,615

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Apêndice K – Teste de Tukey para o álcali ativo residual com relação ao álcali ativo para as diferentes espessuras

Tabela 87 – Teste de Tukey para a espessura de 0,5 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	CA
A	12.6733	9	21.5
B	9.7333	9	19.5
C	7.0667	9	17.5
D	4.0222	9	15.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 88 – Teste de Tukey para a espessura de 1 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	CA
A	13.5333	9	21.5
B	10.1222	9	19.5
C	8.2111	9	17.5
D	5.1889	9	15.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 89 – Teste de Tukey para a espessura de 2 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	CA
A	14.2444	9	21.5
B	11.0778	9	19.5
C	8.6222	9	17.5
D	5.6778	9	15.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 90 – Teste de Tukey para os cavacos de referência

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	CA
A	14.9344	9	21.5
B	12.0567	9	19.5
C	8.5222	9	17.5
D	6.0078	9	15.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 91 – Teste de Tukey para a carga de 15,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	20,39152	6,797173	5,32173	0,00433
Resíduos	32	40,87196	1,277249		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	1,16666	-0,27677	2,610106	0,14778
2-0.5	1,65555	0,212117	3,098995	0,01956
3.6-0.5	1,98555	0,542117	3,428995	0,00397
2-1	0,48888	-0,95455	1,932328	0,79562
3.6-1	0,81888	-0,62455	2,262328	0,42803
3.6-2	0,33	-1,11344	1,773439	0,92511

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 92 – Teste de Tukey para a carga de 17,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	13,77889	4,592963	2,8929	0,05044
Resíduos	32	50,8048	1,58765		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	1,14444	-0,46486	2,753749	0,2373
2-0.5	1,55555	-0,05375	3,16486	0,0611
3.6-0.5	1,45555	-0,15375	3,06486	0,0877
2-1	0,41111	-1,19819	2,020415	0,8993
3.6-1	0,31111	-1,29819	1,920415	0,9527
3.6-2	-0,1	-1,7093	1,509304	0,9982

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 93 – Teste de Tukey para a carga de 19,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	29,18256	9,727521	6,48335	0,0014
Resíduos	32	48,01231	1,500385		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	0,38888	-1,17556	1,95334	0,90633
2-0.5	1,34444	-0,22001	2,908896	0,11271
3.6-0.5	2,32333	0,758882	3,887785	0,00177
2-1	0,95555	-0,6089	2,520007	0,36358
3.6-1	1,93444	0,369993	3,498896	0,01065
3.6-2	0,97888	-0,58556	2,54334	0,34272

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si.

Tabela 94 – Teste de Tukey para a carga de 21,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	25,34739	8,449129	4,6744	0,00808
Resíduos	32	57,84004	1,807501		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	0,86	-0,85712	2,577118	0,5469
2-0.5	1,57111	-0,14601	3,288229	0,0826
3.6-0.5	2,26111	0,543993	3,978229	0,0060
2-1	0,71111	-1,00601	2,428229	0,6788
3.6-1	1,40111	-0,31601	3,118229	0,1419
3.6-2	0,69	-1,02712	2,407118	0,6988

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Apêndice L – Teste de Tukey para o álcali ativo residual com relação ao fator H para as diferentes espessuras

Tabela 95 – Teste de Tukey para a espessura de 0,5 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	FH
A	9.3067	12	451
B	8.1483	12	1244
B	7.6667	12	829

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 96 – Teste de Tukey para a espessura de 1 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	FH
A	9.7167	12	451
A	9.3750	12	829
A	8.7000	12	1244

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 97 – Teste de Tukey para a espessura de 2 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	FH
A	10.4833	12	451
B	10.0417	12	829
B	9.1917	12	1244

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 98 – Teste de Tukey para os cavacos de referência

Means with the same letter are not significantly different.				
Tukey Grouping		Mean	N	FH
	A	11.5658	12	451
B	A	10.3833	12	829
B		9.1917	12	1244

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 99 – Teste de Tukey para o fator H de 451 entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	35,50644	11,83548	1,02682	0,38997
Resíduos	44	507,1587	11,52633		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	0,41	-3,29069	4,110685	0,99087
2-0.5	1,17666	-2,52402	4,877352	0,83072
3.6-0.5	2,25916	-1,44152	5,959852	0,37277
2-1	0,76666	-2,93402	4,467352	0,94520
3.6-1	1,84916	-1,85152	5,549852	0,54662
3.6-2	1,082	-2,61819	4,783185	0,86264

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 100 – Teste de Tukey para o fator H de 829 entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	52,55167	17,51722	1,49866	0,22809
Resíduos	44	514,295	11,68852		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	1,70833	-2,0183	5,434964	0,61521
2-0.5	2,375	-1,35163	6,101631	0,33509
3.6-0.5	2,71666	-1,00996	6,443297	0,22402
2-1	0,66666	-3,05996	4,393297	0,96363
3.6-1	1,00833	-2,7183	4,734964	0,88761
3.6-2	0,34166	-3,38496	4,068297	0,99476

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 101 – Teste de Tukey para o fator H de 1244 entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	8,894692	2,964897	0,2249	0,87854
Resíduos	44	579,9427	13,18052		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	0,55166	-3,40567	4,509001	0,9821
2-0.5	1,04333	-2,914	5,000668	0,8949
3.6-0.5	1,04333	-2,914	5,000668	0,8949
2-1	0,49166	-3,46567	4,449001	0,9872
3.6-1	0,49166	-3,46567	4,449001	0,9872
3.6-2	-1,8E-1	-3,95733	3,957335	

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si.

Apêndice M – Teste de Tukey para o álcali ativo consumido com relação ao álcali ativo para as diferentes espessuras

Tabela 102 – Teste de Tukey para a espessura de 0,5 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	CA
A	289.134	9	21.5
B	269.633	9	19.5
C	251.581	9	17.5
D	229.391	9	15.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 103 – Teste de Tukey para a espessura de 1 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	CA
A	281.839	9	21.5
B	266.221	9	19.5
C	241.372	9	17.5
D	216.902	9	15.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 104 – Teste de Tukey para a espessura de 2 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	CA
A	284.136	9	21.5
B	263.456	9	19.5
C	241.163	9	17.5
D	219.217	9	15.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 105 – Teste de Tukey para os cavacos de referência

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	CA
A	269.621	9	21.5
B	251.382	9	19.5
C	234.971	9	17.5
D	217.280	9	15.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 106 – Teste de Tukey para a carga de 15,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	934,6917	311,5639	1,29397	0,29334
Resíduos	32	7704,952	240,7797		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-12,489	-32,3076	7,329371	0,33661
2-0.5	-10,17	-29,9925	9,644502	0,51406
3.6-0.5	-12,11	-31,9295	7,707531	0,36316
2-1	2,3151	-17,5034	22,13363	0,98881
3.6-1	0,3781	-19,4403	20,19666	0,99994
3.6-2	-1,9369	-21,7555	17,88153	0,99336

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 107 – Teste de Tukey para a carga de 17,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	1278,102	426,0339	2,08360	0,12194
Resíduos	32	6543,036	204,4699		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-10,209	-28,4727	8,05362	0,44087
2-0.5	-10,418	-28,6815	7,844752	0,42320
3.6-0.5	-16,610	-34,8737	1,65262	0,08526
2-1	-0,2088	-18,472	18,05427	0,99998
3.6-1	-6,40	-24,6641	11,86214	0,77847
3.6-2	-6,1921	-24,4553	12,07101	0,79511

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 108 – Teste de Tukey para a carga de 19,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	1702,3	567,4333	4,60381	0,0086
Resíduos	32	3944,092	123,2529		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-3,4117	-17,5912	10,7677	0,91410
2-0.5	-6,1771	-20,3566	8,002332	0,64339
3.6-0.5	-18,251	-32,431	-4,07214	0,00747
2-1	-2,7653	-16,9448	11,41408	0,95155
3.6-1	-14,839	-29,0193	-0,66039	0,03746
3.6-2	-12,074	-26,2539	2,104977	0,11759

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 109 – Teste de Tukey para a carga de 21,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	1854,467	618,1555	5,34224	0,00425
Resíduos	32	3702,746	115,7108		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-7,2947	-21,0336	6,443978	0,48541
2-0.5	-4,9972	-18,736	8,741547	0,75864
3.6-0.5	-19,512	-33,2517	-5,77415	0,00286
2-1	2,29756	-11,4412	16,03633	0,96854
3.6-1	-12,218	-25,9569	1,520633	0,09555
3.6-2	-14,515	-28,2545	-0,77694	0,03518

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Apêndice N – Teste de Tukey para o álcali ativo consumido com relação ao fator H para as diferentes espessuras

Tabela 110 – Teste de Tukey para a espessura de 0,5 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	FH
A	268.786	12	1244
A	264.301	12	829
B	246.717	12	451

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 111 – Teste de Tukey para a espessura de 1 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	FH
A	263.891	12	1244
B	249.555	12	829
B	241.304	12	451

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 112 – Teste de Tukey para a espessura de 2 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	FH
A	260.624	12	1244
A	252.686	12	829
B	242.670	12	451

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 113 – Teste de Tukey para os cavacos de referência

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	FH
A	256.881	12	1244
B	236.917	12	451
B	236.142	12	829

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 114 – Teste de Tukey para o fator H de 451 entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	587,7812	195,9271	0,25861	0,85478
Resíduos	44	33334,06	757,5922		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-5,4136	-35,4159	24,58865	0,96273
2-0.5	-4,0474	-34,0498	25,95481	0,98378
3.6-0.5	-9,7999	-39,8023	20,2023	0,81916
2-1	1,36616	-28,6361	31,36845	0,99934
3.6-1	-4,3863	-34,3886	25,61593	0,97955
3.6-2	-5,7525	-35,7548	24,24977	0,95581

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 115 – Teste de Tukey para o fator H de 829 entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	4825,983	1608,661	2,5515	0,0677
Resíduos	44	27740,36	630,4628		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-14,745	-42,1146	12,62433	0,4827
2-0.5	-11,614	-38,9842	15,75474	0,6713
3.6-0.5	-28,158	-55,5282	-0,78925	0,0416
2-1	3,1304	-24,2391	30,49987	0,9899
3.6-1	-13,413	-40,783	13,95588	0,5625
3.6-2	-16,544	-43,9135	10,82548	0,3814

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 116 – Teste de Tukey para o fator H de 1244 entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	918,5375	306,1792	0,57618	0,63371
Resíduos	44	23381,06	531,3878		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-4,8951	-30,0222	20,23199	0,95380
2-0.5	-8,1628	-33,2899	16,96426	0,82156
3.6-0.5	-11,905	-37,0329	13,22131	0,58958
2-1	-3,2677	-28,3948	21,85937	0,98542
3.6-1	-7,0106	-32,1378	18,11642	0,87830
3.6-2	-3,7429	-28,87	21,38415	0,97841

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Apêndice O – Teste de Tukey para o teor de sólidos secos com relação ao álcali ativo para as diferentes espessuras

Tabela 117 – Teste de Tukey para a espessura de 0,5 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	CA
A	1.24025	9	21.5
B	1.16572	9	19.5
B	1.11852	9	17.5
C	1.00621	9	15.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 118 – Teste de Tukey para a espessura de 1 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	CA
A	1.23405	9	21.5
B	1.15630	9	19.5
C	1.09334	9	17.5
D	0.96191	9	15.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 119 – Teste de Tukey para a espessura de 2 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	CA
A	1.23526	9	21.5
B	1.14834	9	19.5
C	1.07933	9	17.5
D	0.98643	9	15.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 120 – Teste de Tukey para os cavacos de referência

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	CA
A	1.20786	9	21.5
A	1.14431	9	19.5
B	1.04835	9	17.5
B	0.98105	9	15.5

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 121 – Teste de Tukey para a carga de 15,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	0,00896	0,002987	0,3360	0,7993
Resíduos	32	0,284447	0,008889		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-0,0443	-0,16471	0,076121	0,7523
2-0.5	-0,0197	-0,14019	0,100642	0,9701
3.6-0.5	-0,0251	-0,14557	0,095264	0,9414
2-1	0,0245	-0,0959	0,144937	0,9454
3.6-1	0,0191	-0,10127	0,13956	0,9727
3.6-2	-0,0053	-0,12579	0,115039	0,9993

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 122 – Teste de Tukey para a carga de 17,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	0,023116	0,007705	1,6959	0,1875
Resíduos	32	0,145383	0,004543		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-0,0251	-0,11126	0,060913	0,8574
2-0.5	-0,0391	-0,12528	0,046901	0,6107
3.6-0.5	-0,0701	-0,15626	0,01592	0,1426
2-1	-0,0140	-0,1001	0,072075	0,9708
3.6-1	-0,0449	-0,13108	0,041095	0,4988
3.6-2	-0,0309	-0,11707	0,055107	0,7644

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 123 – Teste de Tukey para a carga de 19,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	0,002414	0,000805	0,2169	0,88391
Resíduos	32	0,118676	0,003709		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-0,0094	-0,0872	0,068362	0,9875
2-0.5	-0,0173	-0,09516	0,060399	0,9296
3.6-0.5	-0,0214	-0,09919	0,056368	0,8777
2-1	-0,0079	-0,08574	0,069817	0,9924
3.6-1	-0,0119	-0,08977	0,065786	0,9750
3.6-2	-0,0040	-0,08181	0,073748	0,9989

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 124 – Teste de Tukey para a carga de 21,5% entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	0,005738	0,001913	0,6391	0,5953
Resíduos	32	0,09575	0,002992		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-0,0061	-0,07606	0,063673	0,9950
2-0.5	-0,0049	-0,07485	0,064879	0,9973
3.6-0.5	-0,0323	-0,10225	0,037481	0,5968
2-1	0,00120	-0,06866	0,07107	0,9999
3.6-1	-0,0261	-0,09606	0,043672	0,7414
3.6-2	-0,027	-0,09726	0,042466	0,7143

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Apêndice P – Teste de Tukey para o teor de sólidos secos com relação ao fator H para as diferentes espessuras

Tabela 125 – Teste de Tukey para a espessura de 0,5 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	FH
A	1.19605	12	1244
B	1.12611	12	829
C	1.07586	12	451

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 126 – Teste de Tukey para a espessura de 1 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	FH
A	1.17353	12	1244
B	1.10015	12	829
C	1.06053	12	451

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 127 – Teste de Tukey para a espessura de 2 mm

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	FH
A	1.18367	12	1244
B	1.10448	12	829
C	1.04887	12	451

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 128 – Teste de Tukey para os cavacos de referência

Means with the same letter are not significantly different.				
Tukey Grouping		Mean	N	FH
	A	1.15248	12	1244
B	A	1.09495	12	451
B		1.03875	12	829

*As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidades

Tabela 129 – Teste de Tukey para o fator H de 451 entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	0,014315	0,004772	0,3219	0,8094
Resíduos	44	0,652062	0,01482		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-0,0153	-0,14803	0,117361	0,9896
2-0.5	-0,0269	-0,15969	0,105705	0,9479
3.6-0.5	0,01908	-0,11361	0,151781	0,9804
2-1	-0,0116	-0,14435	0,121038	0,9953
3.6-1	0,0344	-0,09827	0,167115	0,8993
3.6-2	0,04607	-0,08662	0,178772	0,7905

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 130 – Teste de Tukey para o fator H de 829 entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	0,050637	0,016879	1,5661	0,211
Resíduos	44	0,474215	0,010778		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-0,0259	-0,13912	0,087201	0,9275
2-0.5	-0,0216	-0,13479	0,091532	0,9562
3.6-0.5	-0,0873	-0,20051	0,02581	0,1819
2-1	0,00433	-0,10883	0,117493	0,9996
3.6-1	-0,0613	-0,17455	0,051771	0,4767
3.6-2	-0,0657	-0,17888	0,047439	0,4168

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Tabela 131 – Teste de Tukey para o fator H de 1244 entre as espessuras 0,5, 1, 2 e 3,6 mm

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	0,012234	0,004078	0,5064	0,6798
Resíduos	44	0,35428	0,008052		

Níveis	Centro	Limite.Inferior	Limite.Superior	P-valor
1-0.5	-0,0225	-0,12032	0,075295	0,9268
2-0.5	-0,0123	-0,11019	0,085433	0,9865
3.6-0.5	-0,0435	-0,14138	0,054238	0,6665
2-1	0,0101	-0,08767	0,107948	0,9924
3.6-1	-0,0210	-0,11887	0,076752	0,9390
3.6-2	-0,0312	-0,12901	0,066614	0,8294

*Valores de P maior que 0,05 não diferem estatisticamente entre si

Apêndice Q – Análise de regressão (stepwise) para os diferentes parâmetros para as diferentes espessuras

Tabela 132 – Análise de regressão para o número kappa para a espessura de 0,5 mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	ICA		1	0.6026	0.6026	54.4564	51.55	<.0001
2	FH	FH	2	0.2242	0.8298	7.6899	42.70	<.0001
3	LCA		3	0.0348	0.8616	2.1152	8.05	0.0078

Tabela 133 – Análise de regressão para o número kappa para a espessura de 1 mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	ICA		1	0.4771	0.4771	116.889	31.03	<.0001
2	LFH		2	0.3553	0.8324	17.7247	69.95	<.0001
3	LCA		3	0.0555	0.8879	3.9171	15.85	0.0004
4	CA	CA	4	0.0056	0.8935	4.3175	1.64	0.2104

Tabela 134 – Análise de regressão para o número kappa para a espessura de 2 mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	ICA		1	0.5957	0.5957	141.108	50.10	<.0001
2	LFH		2	0.2959	0.8917	16.3922	90.14	<.0001
3	LCA		3	0.0369	0.9286	2.5919	16.53	0.0003
4	CA	CA	4	0.0013	0.9298	4.0522	0.56	0.4612

Tabela 135 – Análise de regressão para o número kappa para a espessura de 3,6 mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	ICA		1	0.5857	0.5857	323.541	48.06	<.0001
2	IFH		2	0.3570	0.9427	19.2111	205.42	<.0001
3	LCA		3	0.0157	0.9584	7.7209	12.09	0.0015
4	LFH		4	0.0058	0.9641	4.7662	4.99	0.0328
5	CA	CA	5	0.0009	0.9650	6.0000	0.77	0.3884

Tabela 136 – Análise de regressão para o rendimento depurado para a espessura de 0,5 mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	FH	FH	1	0.3451	0.3451	28.1468	17.92	0.0002
2	ICA		2	0.3082	0.6534	1.8375	29.34	<.0001
3	LCA		3	0.0065	0.6599	3.2402	0.61	0.4398
4	CA	CA	4	0.0124	0.6723	4.1005	1.17	0.2870

Tabela 137 – Análise de regressão para o rendimento depurado para a espessura de 1 mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	ICA		1	0.5228	0.5228	58.4231	37.25	<.0001
2	FH2		2	0.2937	0.8165	4.7636	52.84	<.0001
3	LCA		3	0.0158	0.8324	3.7618	3.02	0.0916
4	CA	CA	4	0.0092	0.8416	4.0096	1.81	0.1883

Tabela 138 – Análise de regressão para o rendimento depurado para a espessura de 2 mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	FH	FH	1	0.3513	0.3513	32.5201	18.41	0.0001
2	ICA		2	0.3429	0.6942	0.4166	37.00	<.0001

Tabela 139 – Análise de regressão para o rendimento depurado para a espessura de 3,6 mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	CA2		1	0.2606	0.2606	25.9588	11.98	0.0015
2	FH2		2	0.0648	0.3253	22.8818	3.17	0.0843
3	FH	FH	3	0.2763	0.6017	3.2225	22.20	<.0001

Tabela 140 – Análise de regressão para o álcali ativo residual para a espessura de 0,5 mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	CA	CA	1	0.9168	0.9168	30.0174	374.67	<.0001
2	IFH		2	0.0301	0.9469	9.5973	18.68	0.0001
3	LFH		3	0.0123	0.9592	2.3992	9.68	0.0039

Tabela 141 – Análise de regressão para o álcali ativo residual para a espessura de 1mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	CA2		1	0.8867	0.8867	6.9248	266.17	<.0001
2	FH2		2	0.0174	0.9041	2.9422	5.99	0.0198

Tabela 142 – Análise de regressão para o álcali ativo residual para a espessura de 2 mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	CA	CA	1	0.8847	0.8847	7.4080	260.79	<.0001
2	FH2		2	0.0256	0.9103	0.6468	9.43	0.0042

Tabela 143 – Análise de regressão para o álcali ativo residual para a espessura de 3,6 mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	CA2		1	0.8356	0.8356	20.9503	172.80	<.0001
2	FH	FH	2	0.0683	0.9039	0.9611	23.44	<.0001

Tabela 144 – Análise de regressão para o álcali ativo consumido para a espessura de 0,5 mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	LCA		1	0.7646	0.7646	44.6355	110.46	<.0001
2	IFH		2	0.1414	0.9060	0.5956	49.66	<.0001

Tabela 145 – Análise de regressão para o álcali ativo consumido para a espessura de 1 mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	ICA		1	0.8064	0.8064	44.5377	141.65	<.0001
2	FH2		2	0.1156	0.9220	0.8342	48.91	<.0001

Tabela 146 – Análise de regressão para o álcali ativo consumido para a espessura de 2 mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	CA	CA	1	0.8096	0.8096	17.2443	144.60	<.0001
2	LFH		2	0.0740	0.8837	0.0972	20.99	<.0001

Tabela 147 – Análise de regressão para o álcali ativo consumido para a espessura de 3,6 mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	CA	CA	1	0.6807	0.6807	30.9118	72.47	<.0001
2	FH2		2	0.1420	0.8226	4.9456	26.41	<.0001
3	LFH		3	0.0249	0.8475	2.0498	5.21	0.0292

Tabela 148 – Análise de regressão para o teor de sólidos secos para a espessura de 0,5 mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	ICA		1	0.6033	0.6033	33.1769	51.71	<.0001
2	FH2		2	0.2050	0.8083	1.4926	35.30	<.0001

Tabela 149 – Análise de regressão para o teor de sólidos secos para a espessura de 1 mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	ICA		1	0.7488	0.7488	64.9184	101.32	<.0001
2	FH2		2	0.1667	0.9154	2.6180	65.05	<.0001
3	LCA		3	0.0016	0.9171	3.9827	0.64	0.4312
4	CA	CA	4	0.0051	0.9222	4.0071	2.04	0.1631

Tabela 150 – Análise de regressão para o teor de sólidos secos para a espessura de 2 mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	CA	CA	1	0.5961	0.5961	34.2873	50.18	<.0001
2	FH2		2	0.2186	0.8147	0.4112	38.93	<.0001

Tabela 151 – Análise de regressão para o teor de sólidos secos para a espessura de 3,6 mm

Summary of Forward Selection								
Step	Variable Entered	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	CA	CA	1	0.6241	0.6241	26.3150	56.46	<.0001
2	FH2		2	0.0725	0.6966	17.0706	7.88	0.0083
3	LFH		3	0.1061	0.8027	2.6102	17.21	0.0002