

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

**Avaliação do processo SuperBatch™ para produção de polpa
celulósica a partir de *Bambusa vulgaris***

Camila Sarto

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

**Piracicaba
2012**

**Camila Sarto
Engenheiro Florestal**

**Avaliação do processo SuperBatch™ para produção de polpa celulósica a
partir de *Bambusa vulgaris***

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

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

**Piracicaba
2012**

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

Sarto, Camila

Avaliação do processo SuperBatch™ para produção de polpa celulósica a partir de *Bambusa vulgaris* / Camila Sarto. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2012.

67 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Bambu 2. Cozimento 3. Polpação 4. Tecnologia de celulose e papel I. Título

CDD 676.14
S251a

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

Aos meus pais, Paschoal e Lúcia,
pelo apoio incondicional aos meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Ao Diego, pelo apoio e companheirismo.

À minhas irmãs, Caroline e Karen, pelo apoio e amizade.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e ao Departamento de Ciências Florestais que permitiram a realizam deste trabalho.

Ao Professor Francides Gomes da Silva Júnior pelos ensinamentos e orientação.

Ao Tiago Segura por sua ajuda, amizade e por todos os momentos de dificuldades no LQCE.

Aos meus amigos de pós-graduação e companheiros de laboratório: Eraldo, Magnos e Flávia.

A Ana Lucia A. Polizel, Denis Zago Costa e Maria Regina Buch pela ajuda nas análises e amizade.

A toda equipe do Laboratório de Química, Celulose e Energia (LQCE), em especial: José Martins, Marina, Beatriz, Christie, Adriana, Vilson, Guilherme, Marcela, Camila, Anderson, Eduardo, Vitoria, Luís Fernando, Aline, Isabela.

Aos meus amigos de pós-graduação: Juliana, Paula, Saly, Marta, Angela, Alexandre, Vinicius, Felipe pela amizade e pelos momentos felizes.

Ao Laboratório de Anatomia da Madeira da ESALQ e sua equipe pela colaboração, em especial: Vinicius, Alisson, Moisés e Maria.

Ao Instituto Agrônômico, pesquisador Fernando Tombolato, pelo fornecimento dos colmos de *Bambusa vulgaris*.

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa concedida.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito Obrigado!

EPIGRAFE

Penso no que faço, com fé.
Faço o que devo fazer, com amor.
Eu me esforço para ser cada dia melhor,
pois bondade também se aprende.
Mesmo quando tudo parece desabar,
cabe a mim decidir
entre rir ou chorar,
ir ou ficar,
desistir ou lutar;
porque descobri,
no caminho incerto da vida,
que o mais importante é o decidir.

Cora Coralina

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Bambu	17
2.2 Polpação	24
2.2.1 Processos modificados.....	28
2.2.1.1 Processo SuperBatch™	30
3 MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1 Material.....	35
3.2 Métodos.....	35
3.2.1 Densidade básica.....	35
3.2.2 Composição química.....	36
3.2.3 Caracterização morfológica das fibras	36
3.2.4 Impregnação aquosa.....	37
3.2.5 Processo convencional.....	37
3.2.6 Processo SuperBatch™	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
4.1 Densidade básica.....	41
4.2 Composição Química	41
4.3 Morfologia de fibras	42
4.4 Impregnação aquosa.....	43
4.5 Processo de polpação	47
4.5.2 Análise de licor	52
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS.....	59
APÊNDICES.....	63

RESUMO

Avaliação do processo SuperBatch™ para produção de polpa celulósica a partir de *Bambusa vulgaris*

O presente estudo teve como objetivo avaliar e comparar os processos de polpação kraft convencional e SuperBatch™ para *Bambusa vulgaris* visando a produção de polpa celulósica não branqueável (número kappa 58 ± 2). A matéria-prima foi caracterizada com relação à densidade básica, composição química e dimensões de fibras; foi realizado um estudo de pré-extração aquosa com as temperaturas de 50, 70 e 90°C durante 5 horas pesando-se os cavacos a cada 15 minutos para avaliar a absorção de água. Este mesmo procedimento foi feito à temperatura de 110°C com tempos de 15 minutos, 1, 2 e 5. Posteriormente foram avaliados os teores de extrativos totais e lignina dos cavacos oriundos das temperaturas 50, 70, 90 e 110°C nos tempos de 1 e 5 horas. Para os processos de polpação avaliou-se, o rendimento bruto, rendimento depurado, teor de rejeitos, ácidos hexenurônicos e alvura, além da eficiência da adição de um estágio de pré-extração aquosa. Os resultados obtidos mostram que a matéria-prima apresentou valores típicos para a espécie em questão no que diz respeito à densidade básica, composição química e morfologia das fibras. Através de uma regressão com os resultados de absorção de água e extrativos totais nas diferentes temperaturas foi estabelecido a temperatura 80°C e tempo de 1 hora como a ideal para a pré-extração aquosa. Para o processo de polpação kraft convencional o nível de deslignificação foi obtido com carga alcalina de 14% (base NaOH); para o processo SuperBatch™ o nível de deslignificação estabelecido foi obtido com uma carga de reagentes químicos de 16% (base NaOH). A impregnação aquosa contribuiu para uma melhor deslignificação somente no processo convencional.

Palavras-chave: Cozimento modificado; Não madeiras; Bambu; Processos de polpação

ABSTRACT

Evaluation of SuperBatch™ process for the production of pulp from *Bambusa vulgaris*

The present study aimed to evaluate and compare the kraft pulping conventional processes and SuperBatch™ for *Bambusa vulgaris* aiming the production of pulp unbleached (kappa number 58 ± 2). The raw material was characterized with respect to basic density, chemical composition and morphology of fibers, was analyzed an aqueous pre-extraction temperatures of 50, 70 and 90 °C for 5 hours weighing the chips to every 15 minutes to evaluate the absorption of water. The same procedure was done for 110 °C were used time of 15 minutes, 1, 2 and 5 hours. After this stage were evaluated the total extractives and lignin content from the chips of the temperatures 50, 70, 90 and 110 °C for 1 and 5 hours. For the pulping processes were evaluated, the total yield, screened yield, reject content, HexA and brightness, besides the efficiency of the addition of a pre-stage aqueous extraction. The results show that the raw material had values typical for the species in question with regard to density, chemical composition and fibers morphology. Through a regression with the results of water absorption and extractives was set at different temperatures the temperature 80 °C as optimal for pre-aqueous extraction. For the conventional kraft pulping process the level of delignification was obtained with the alkali charge of 14% (based on NaOH); SuperBatch™ process for the level of delignification has been achieved with a set of chemical reactants load 16% (base NaOH). The aqueous pre-extraction contributed to a better delignification only in the conventional process.

Keywords: Modified pulping; Non-wood; Bamboo; Pulping process

1 INTRODUÇÃO

A indústria brasileira de celulose e papel está fundamentada, principalmente, na produção de celulose de fibra curta, oriunda da madeira de espécies de folhosas. De acordo com o Relatório Anual da BRACELPA (2010/2011), 88,4% da polpa produzida no país é de fibra curta, enquanto que 11,6% são de polpa de fibra longa.

A polpa celulósica é destinada à produção de 3 tipos de papel basicamente: embalagens, papéis para fins sanitários (tissue) e imprimir & escrever. O papel para embalagem deve ser manufaturado a partir de celulose de fibra longa, ou pelo menos com maior parte dessas, devido as maiores resistências exigidas neste tipo de papel; já nos outros dois casos, os dois tipos de fibras podem ser empregados, variando em função das características que se quer obter no produto final (VASCONCELOS, 2005).

Os dados do relatório da BRACELPA 2010 revelam que o setor de celulose e papel brasileiro tem se consolidado como produtor de polpa celulósica de fibra curta, especificamente de eucalipto. Observa-se que a produção de polpa celulósica de fibra longa não tem apresentado uma expansão significativa desde a década de 1990; este fato em especial, mostra que o país está se tornando deficitário na produção de polpa de fibra longa que normalmente é utilizada para produção de papel de embalagens (Gomes, 2011). No que diz respeito às importações, o Brasil importou no ano de 2011 390 000 toneladas de celulose de fibra longa (CONJUNTURA BRACELPA – 39).

De modo geral, as fibras provenientes de vegetais, que não formam madeira, constituem 5% do total geral de fibras usadas para a fabricação do papel. Entretanto, elas representam, para muitos países em desenvolvimento e mesmo para muitos países industrializados, uma das maiores fontes atuais e potenciais de fibras (KOGA, 1988).

Apesar do bambu não ser matéria-prima de grande importância mundial ou nacional para a produção de celulose e papel, trata-se de planta que apresenta rápido crescimento e características desejáveis para finalidades celulósico-papeleiras. Entretanto, para se aproveitar ao máximo à potencialidade do bambu, como matéria prima para a produção de celulose e papel, tornam-se necessários estudos mais detalhados de suas características anatômicas e de sua constituição química (GOMIDE; OLIVEIRA; COLODETTE, 1981).

O bambu é a principal fonte de matéria-prima (mais de 60%) para produção de celulose e papel na Índia, sendo também utilizado para produção de papel em Bangladesh, China, Quênia, Filipinas e Formosa. Embora seja o bambu reconhecido como importante fonte alternativa de matéria-prima para a produção de celulose de fibra longa, apenas uma pequena percentagem da produção nacional (0,41% da produção de celulose do ano de 2009) de celulose e papel é produzida com esse material. A lenta evolução no Brasil do uso do bambu para a produção de celulose pode ser entendida como resultado de algumas desvantagens dessa matéria-prima, como seus altos teores de extrativos e de sílica. Segundo o relatório estatístico da BRACELPA de 2009/ 2010 a Itapagé SA Celulose Papéis e Artefatos utiliza bambu para uma produção de 56.000 toneladas de polpa celulósica e a indústria Celulose e Papel de Pernambuco SA produziu 36.000 toneladas.

A utilização do bambu como matéria prima para a indústria de celulose e papel pode ser uma alternativa principalmente por se tratar de uma matéria-prima perene de rápido crescimento e fornecer fibras longas.

O bambu é rico em amido, o que reduz o rendimento do processo de polpação e eleva o consumo dos reagentes, também aumenta a viscosidade do licor negro o que acarreta problemas na recuperação química, por estas razões, o aproveitamento do amido antes da deslignificação dos cavacos é de fundamental importância para uma otimização na produção de polpa celulósica a partir do bambu (AZZINI et al., 1986).

Esse trabalho teve por objetivo analisar o impacto de uma etapa de impregnação aquosa dos cavacos de *Bambusa vulgaris* submetidos ao processo SuperBatch™ de polpação kraft tendo o processo kraft convencional como referência.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Bambu

As espécies vegetais conhecidas vulgarmente como “bambu” pertencem à família Poaceae (anteriormente Gramineae), e estão agrupados na subfamília Bambusoideae; esta subfamília possui 75 gêneros e 1250 espécies, ocorre naturalmente no mundo inteiro com exceção da Europa e representa uma matéria-prima de elevada importância, principalmente nos países asiáticos, onde é encontrado o maior número de espécies. No Brasil, existem cerca de 80 espécies diferentes, pertencentes a 10 gêneros (AZZINI et al., 1987). O mesmo autor divide os bambus de acordo com a forma de desenvolvimento dos colmos: bambu em touceira ou bambu alastrante. No primeiro grupo, formado basicamente por espécies tropicais, os colmos encontram-se agrupados formando uma moita ou touça. No segundo grupo, de espécies de clima temperado, os colmos nascem isoladamente.

O crescimento do bambu ocorre de maneira diferente das árvores. Os colmos saem da terra com diâmetro e número de nós definidos e, em menos de 1 ano, atingem a altura máxima. Após o primeiro ano, os colmos vão amadurecendo, isto é, vão mudando suas características internas, tornando-se mais resistentes. As espécies de bambu podem ser encontradas em altitudes que variam do nível do mar até 4800 metros; resistem desde temperaturas abaixo de zero até temperaturas tropicais. Crescem como pequenas gramíneas e podem chegar até extremos de 40 metros de altura (AZZINI et al., 1987).

O bambu é um recurso natural que pode ser empregado em diversos usos: compensados de bambu são utilizados em paredes e pisos como revestimentos; sua polpa serve como matéria-prima na produção de papel e celulose; ele ainda é utilizado conjuntamente com o concreto na construção civil, entre outros usos. Alguns usos e espécies são destacados por Azzini et al. (1987), como:

- Polpa celulósica: *Bambusa vulgaris*, *Phyllostachys bambusoides*, *Dendrocalamus giganteus*;
- Álcool: *B. vulgaris*, *Guadua flabelata*, *B. vulgaris* var. *vittata*;
- Alimentação: *Phyllostachys* sp., *Dendrocalamus* sp., *Bambusa* sp;
- Ornamentação: *B. gracilis*, *P. nigra*, *P. purpurata*, *Thyrsostachys siamensis*, *Arundinaria amabilis*, *Arundinaria* sp;

- Construção civil: *Phyllostachys sp.*, *Guadua sp.*, *B. tuldooides*, *D. giganteus*.

Dentre as espécies comerciais introduzidas destaca-se o *Bambusa vulgaris* Schrad., utilizada nos programas de plantio principalmente no nordeste do país, ocupando 35 000 – 40 000 ha para a produção de celulose de fibra longa. Apesar do elevado potencial das espécies de bambu no Brasil, são poucas as pesquisas dirigidas para as áreas silvicultural e tecnológica (BRITO; TOMAZELLO FILHO; SALGADO, 1986).

Apesar da falta de conhecimento tecnológico específico no que se refere ao processamento dessa espécie, o bambu oferece amplas possibilidades agrônômicas por ser uma planta perene e apresentar altos índices de produção de biomassa por unidade de área (AZZINI et al.,1987). Segundo Koga (1988) sua cultura é de fácil manejo e pode ser explorado economicamente a partir do terceiro ano, sugerindo-se um ciclo de 3 a 5 anos.

No Brasil, a cultura do bambu é relativamente pouco definida e as informações encontradas na literatura são variáveis de espécie para espécie, e dentro de uma mesma espécie, de acordo com as condições edafo-climáticas, espaçamento, sistema de colheita, adubação, dentre outros (AZZINI; SALGADO, 1982). McClure apud Azzini e Salgado (1982), salientou produções de 4 toneladas de celulose seca por acre por ano, e, colheita com intervalo de 3 anos para a espécie *Bambusa vulgaris* em Trindade. Essa produção, considerando um rendimento de conversão em celulose de 40% equivale a 25 t/ha.ano de colmos secos. Na Índia, onde as espécies *D. strictus* e *B. arundinace* representam mais de 70% da matéria prima fibrosa utilizada pela indústria de celulose e papel, seus plantios homogêneos de *B. arundinacea* conduzida pela “West Coast Paper Mills”, o rendimento agrícola obtido foi de 25 t/ha.ano de colmos secos. Chen, apud Azzini e Salgado (1982), nos Estados Unidos da América, trabalhando com *Phyllostachys bambusoides* e *Pinus taeda*, obteve produções respectivamente de 35 e 20 t/ha.ano de matéria seca. No Brasil, a produção de *B.vulgaris* var. *vittata*, em solo de cerrado de baixa fertilidade, no Município de Mogi-Guaçu, foi de 13t/ha.ano de colmos.

Uma das principais vantagens da utilização do bambu como matéria prima para a produção de celulose e papel é o seu rápido crescimento, sendo muito maior que o das espécies madeireiras. O primeiro corte pode ser realizado aos três anos de idade e os seguintes realizados de dois em dois anos. A produtividade fica em torno de 18 a 25 toneladas/ha.ano (MATOS JÚNIOR, 2004 apud AZAMBUJA, 2010),

enquanto a produtividade do pinus fica em torno de 36,9 m³/ha.ano (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF, 2012), considerando uma densidade básica média para o *Pinus taeda* de 428 kg/m³, temos 15,8 toneladas/ ha.ano.

O conhecimento da constituição química da matéria-prima utilizada para a produção de polpa celulósica permite uma melhor compreensão das reações químicas que ocorrem durante a polpação e o branqueamento, possibilitando, ainda, um controle inteligente das operações de deslignificação, branqueamento e refinamento (GOMIDE; OLIVEIRA; COLODETTE, 1981).

O teor de holocelulose, variando entre 60 e 75% (KLEINE; FOELKEL, 2012), constitui uma das vantagens do bambu para a produção de polpa celulósica e o teor de lignina, variando entre 17 a 24% de lignina insolúvel em ácido e 1 a 1,5% de lignina solúvel (KLEINE; FOELKEL, 2012), indicam que a deslignificação do bambu durante a polpação pode ser realizada sem dificuldades (VERA FERNÁNDEZ, 2010).

De acordo com os resultados encontrados no trabalho de Gomide, Oliveira e Colodette (1981) o *B. vulgaris* apresenta teores variados de holocelulose, em função da idade do colmo. Observou-se que até 3 anos de idade há uma diminuição do teor de holocelulose com o aumento da idade; e que após 3 anos o aumento da idade favorece a elevação do teor de holocelulose. Sendo que os teores mais elevados de holocelulose e, portanto, os mais desejados para produção de polpa celulósica, foram obtidos nas idades de 1 e 5 anos.

A espécie *Bambusa vulgaris* apresenta um alto teor de extrativos, tratando-se em grande parte de substâncias amiláceas, o que constitui uma desvantagem para a produção de polpa celulósica, o colmo de bambu com 40% de tecido fibroso e 50% de tecido parenquimatoso rico em amido, não deve ser processado convencionalmente na forma de cavacos a semelhança das espécies arbóreas (madeiras), pois a elevada concentração de amido nos cavacos (20 a 35%) contribui para reduzir o rendimento de conversão em fibras celulósicas e elevar o consumo de reagentes químicos durante a deslignificação dos cavacos. Além disso, os açúcares (glucose) provenientes do desdobramento do amido são acumulados no licor negro após a deslignificação, elevando sobremaneira sua densidade e viscosidade, dificultando sua movimentação nas várias etapas do processamento (AZZINI et al., 1986).

De acordo com Gomide, Oliveira e Colodette (1981) os teores de lignina determinados em diferentes idades do *B. vulgaris* variaram entre 21,8% e 25%, aproximando-se dos limites inferiores característicos das madeiras de coníferas e dos limites superiores das madeiras de eucalipto, verificou-se que com o aumento da idade, ocorreu uma elevação do teor de lignina. Considerando-se que o bambu é uma gramínea, sua lignina deveria ser constituída não só por unidades de guaiacil e siringil, mas também, por teores relativamente elevados de p-hidroxifenil.

O *B. vulgaris* apresentou, em todas as idades analisadas, alto teor de cinzas, variando de 2,2 a 3,2%. Esses altos teores de cinzas deverão ter pequena influência na qualidade do papel, mas por causa da presença de sílica, poderão causar problemas na polpação do bambu, dificultando a recuperação dos reagentes no licor residual. Pode-se observar uma tendência de aumento de teor de sílica no *B. vulgaris* em função da idade. Em todas as idades analisadas o teor de sílica foi elevado; o valor mais baixo de sílica foi obtido nos colmos de 1 ano (0,22%) e o mais alto nos colmos de 5 anos (0,82%). Esses teores de sílica poderão causar sérios problemas na secção de recuperação do processo kraft, uma vez que grande parte da sílica poderá ser dissolvida no licor de polpação. A sílica, em combinação com íons de cálcio, poderá depositar-se nas paredes internas dos tubos do evaporador, formando uma crosta dura que afetará seriamente a transferência de calor e que deverá ser frequentemente removida por meios mecânicos ou mecânicos-químico (GOMIDE; OLIVEIRA; COLODETTE, 1981).

Quanto à anatomia o bambu é constituído por células parenquimatosas, vasos e fibras. Segundo Gomide, Oliveira e Colodette (1981) as fibras e os vasos são dispostos em forma de feixes vasculares dispersos num tecido de células parenquimatosas. Os elementos anatômicos são dispostos longitudinalmente em relação ao eixo do colmo, numa estrutura bastante compacta, que se caracteriza pela ausência de elementos radiais. As cavidades de ar são restritas aos lumes das fibras e dos vasos que formam o sistema capilar do bambu. As fibras são dispostas em forma de feixes concentrados principalmente na região periférica do colmo.

Segundo Tomazello Filho e Azzini (1987) os colmos de bambu em sua seção transversal apresentam uma estrutura anatômica caracterizada por numerosos feixes vasculares envolvidos por células de parênquima, com uma epiderme formada por uma fileira de células epiteliais seguidas por células de esclerênquima. Nos internódios as células estão dispostas no sentido longitudinal, não possuindo células

dispostas no sentido radial, como os raios nas dicotiledôneas e gimnospermas. Os tecidos dos colmos de bambu são constituídos dos seguintes tipos de células: células de parênquima formando o tecido fundamental; vasos, elementos crivados com células companheiras e cordões de esclerênquima formando os feixes fibrovasculares e; fibras, formando as bainhas de fibras.

Os feixes vasculares são formados pelo xilema, com dois vasos largos de metaxilema, pelo floema com tubos crivados do floema são envolvidos por bainhas de esclerênquima (NOGUEIRA, 2008). A anatomia do colmo em um corte transversal pode ser observada na Figura 1.

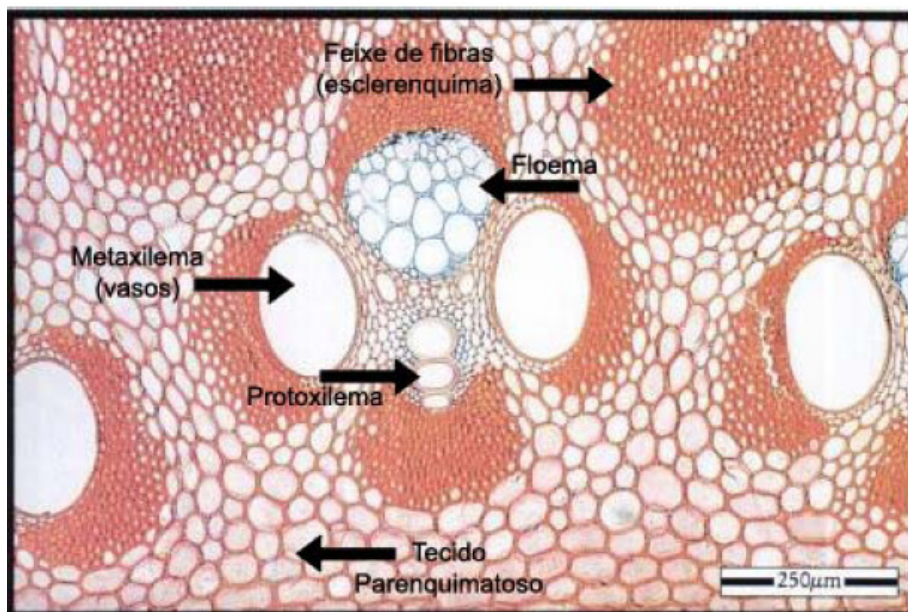


Figura 1 – Elementos anatômicos da espécie *Phyllostachys edulis* vistos na seção transversal.

Fonte: Liese (1998 apud NOGUEIRA, 2008)

O feixe vascular do tipo III consiste de um feixe vascular central com bainhas de esclerênquima e um feixe de fibra isolado. Enquanto o feixe vascular do tipo IV está situado entre dois tipos de fibras isolados localizados ao lado do floema e protoxilema. O feixe vascular apresenta-se acompanhado por bainhas de esclerênquima pequenas. As espécies de bambu que possuem esse tipo de feixe vascular são dos gêneros *Giganchloa*, *Dendrocalamus*, *Bambusa* (LYBEER, 2006 apud NOGUEIRA, 2008).

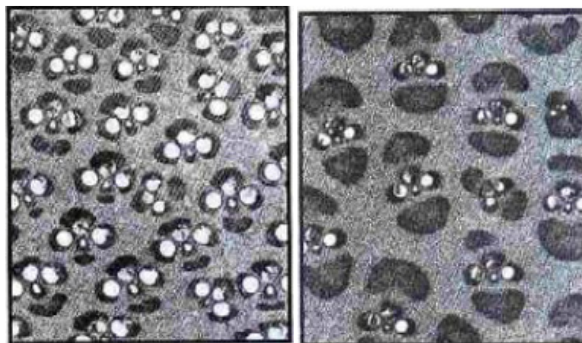


Figura 2 – Tipos de feixes vasculares III e IV

Fonte: Lopez (2003 apud NOGUEIRA, 2008) e Lybeer (2006 apud NOGUEIRA, 2008)

Verifica-se que o comprimento das fibras do *Bambusa vulgaris*, variando entre 1,6 a 3,5 mm (KLEINE; FOELKEL, 2012), é comparável ao das madeiras de coníferas, apresentando, entretanto, largura bem inferior à das fibras dessas madeiras. A fibra de *Bambusa vulgaris* é, em linhas gerais, longa e estreita, com lume fino e paredes relativamente espessas. As características dimensionais das fibras do *B. vulgaris* devem proporcionar-lhes resistência a polpa produzida (GOMIDE; OLIVEIRA; COLODETTE, 1981).

De acordo com Azzini et al. (1987) no início da indústria de fabricação de papel, o bambu foi uma das primeiras matérias-primas fibrosas utilizadas. Porém, devido a questões econômicas e de disponibilidade, foi substituído por espécies arbóreas nos países de clima temperado, onde se desenvolveu toda a tecnologia de produção de celulose e papel.

No Brasil, a espécie mais utilizada nos plantios industriais, visando à produção de celulose e papel, é o *Bambusa vulgaris* (GOMIDE; COLODETTE; OLIVEIRA, 1982; TOMAZELLO FILHO; AZZINI, 1987), utilizada nos programas de reflorestamento principalmente no nordeste do país, ocupando cerca de 35.000 – 40.000 ha para a produção de celulose de fibra longa.

As espécies de bambus apresentam grandes possibilidades de sucesso como fornecedoras de matéria-prima para a indústria de celulose. Existem pesquisas (AZZINI; CIARAMELLO; NAGAI, 1971, apud BARRICHELO; FOELKEL, 1975) que indicam que os bambus podem produzir celulose de ótimas qualidades pelos processos convencionais de cozimento (BARRICHELO; FOELKEL, 1975).

Apesar da elevada potencialidades das espécies de bambu no Brasil são poucas as pesquisas dirigidas para as áreas silvicultural e tecnológica, incluindo-se os estudos sobre estrutura dos colmos (TOMAZELLO FILHO; AZZINI, 1987).

De acordo com Azzini e Salgado (1982), para o aproveitamento da potencialidade do bambu como matéria prima industrial, tanto para produção de celulose e papel, como para a obtenção de etanol, amido e alimentos, há necessidade de se conhecer melhor essa matéria prima, em seus aspectos agronômicos e tecnológicos.

Segundo Azzini e Salgado (1982), os conhecimentos tecnológicos desenvolvidos para as madeiras dificilmente se adaptam adequadamente quando aplicados ao bambu, simplesmente por se tratarem de matérias-primas totalmente diversas, em seus aspectos anatômicos, químicos e físicos. A aplicação de conhecimentos tecnológicos inadequados ao bambu tem gerado objeções com reflexos negativos a sua utilização. Uma das objeções levantadas contra o bambu é com relação a maior dificuldade de obtenção de cavacos em comparação com as madeiras. Essa objeção reflete muito bem a necessidade de conhecimentos tecnológicos específicos para o processamento do bambu, pois no caso particular, o problema não é da matéria-prima, e sim do picador que não é adequado para picar colmo de bambu, o qual reduz a durabilidade das facas do picador. As demais objeções levantadas contra o emprego do bambu, visando à produção de celulose e papel, são todas de natureza tecnológicas, e, por essa razão não invalidam as possibilidades de utilização dessa espécie vegetal como fonte alternativa de fibras longas.

A potencialidade do bambu como matéria prima para produção de polpa celulósica e papéis de elevada resistência tem sido demonstrada por diversos pesquisadores ao longo do mundo. Em alguns países como a China e a Índia, o bambu constitui a principal fonte de matéria-prima para a produção de celulose e papel (VERA FERNANDEZ, 2010).

Foelkel e Barrichello (1975) em seus estudos indicam que existem diversos métodos propostos para a obtenção de celulose de bambu e que os principais são: processo soda, processo sulfato e processo sulfito neutro. As celuloses obtidas apresentam rendimentos superiores a 50%, alta resistência ao rasgo e razoáveis à tração e ao arrebatamento quase próximas as apresentadas por polpas celulósicas derivadas de coníferas.

Gomide et al. (1982), cita que a celulose de bambu é bem diferente das outras celuloses, tanto de fibras de madeiras como de não madeiras, apresentando alta resistência ao rasgo, semelhante ou superior a de celulose kraft de coníferas, e resistência à tração e ao estouro também semelhantes as dessas celuloses. Devido à alta relação comprimento/diâmetro, as fibras de bambu apresentam alta flexibilidade e são também relativamente macias, são indicadas para a produção de vários tipos de papéis, como absorvente, embalagem, impressão, escrita, entre outros. Apesar das vantagens agrônômicas e tecnológicas, a produção de polpa celulósica a partir do bambu ainda pode ser considerada pequena. Esse fato pode ser explicado, entre outras razões, pela deficiência de informações técnico-científicas sobre a constituição química e anatômica do bambu; e de conhecimentos tecnológicos referentes aos parâmetros de processamento industrial adequado para essa matéria-prima.

De acordo com Azzini e Salgado (1982) a situação do bambu, quanto a sua utilização para papel é semelhante a do eucalipto no passado, que por falta de uma tecnologia específica para fibras curtas, permaneceu durante longo tempo como uma espécie de baixo valor industrial para produção de celulose. No entanto hoje, em 2012, o eucalipto é a principal matéria-prima brasileira utilizada para produção de polpa celulósica, com uma tecnologia de utilização especialmente desenvolvida para o eucalipto, desde a produção de sementes geneticamente melhoradas até a produção de celulose e manufatura de papel de excelente qualidade, que tem sido exportado para o mercado internacional.

2.2 Polpação

A eficiência global dos processos de polpação depende da eficiência de cada uma das operações unitárias envolvidas. A impregnação dos cavacos é uma das operações unitárias determinantes para a eficiência dos processos de polpação. De acordo com Foelkel (2009) as baixas temperaturas e a boa impregnação favorecem a etapa de deslignificação principal e a seletividade da polpação. Boa seletividade significa alta deslignificação com baixa degradação de carboidratos. Pode ser medida tanto pela relação rendimento depurado/número kappa ou viscosidade da polpa/número kappa.

Uma impregnação eficiente dos cavacos favorece:

- Redução do teor de rejeitos;
- Redução do número kappa;
- Maior uniformidade do número kappa entre as fibras da polpa;
- Menor consumo de álcali efetivo;
- Maior rendimento de polpação;
- Menor consumo unitário de madeira por tonelada de polpa seca;
- Menor tempo de cozimento;
- Menor necessidade de investimentos no branqueamento e planta química;
- Aumento de produção e de produtividade.

Os cavacos mais úmidos possuem maior facilidade de serem impregnados, apesar de menores velocidades de penetração de licor. Quanto mais úmido o cavaco, menor é a velocidade inicial de penetração do licor de cozimento (FOELKEL, 2009).

Vários fatores influenciam a impregnação e a distribuição dos reagentes químicos nos cavacos da 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 a qualidade do produto final (BUSNARDO; FOELKEL, 1979).

Visando uma melhor impregnação alguns autores introduziram diversos estágios de pré-extração com líxivia negra, pré-hidrólises, dentre outros.

Segundo Gomide et al. (1984) o acréscimo de um estágio de pré-extração alcalina, comparando com o processo convencional, apresentaria os seguintes resultados:

- Provável aumento do tempo total de polpação, podendo prejudicar o volume de produção diária da fábrica;
- As temperaturas mais baixas de impregnação (100 e 120°C) apresentaram em geral os melhores resultados;
- Diminuição do rendimento depurado, mas, para um mesmo número kappa, diminuição também do teor de rejeitos;
- Aumento das resistências da polpa à tração e ao arrebentamento;

- Possível aumento da resistência ao rasgo e do alongamento da polpa celulósica, dependendo do álcali ativo, do grau de refino e da temperatura da pré-extração;
- Apesar de não ter sido determinado em laboratório, já se tem alguma indicação de testes industriais mostrando que o estágio de pré-extração poderá resultar em maior uniformidade das características e propriedades das polpas.

Criado em 1879 por Dahl, químico alemão, o processo kraft de polpação é hoje o mais utilizado no mundo para produção de polpa celulósica. De acordo com Vasconcelos (2005), Segura (2012), em um esforço para encontrar um substituto para o carbonato de sódio (Na_2CO_3) no ciclo de recuperação química do processo soda, foi introduzido o sulfato de sódio (Na_2SO_4), sendo este reduzido a sulfeto de sódio (Na_2S) pela ação da fornalha da caldeira de recuperação e então introduzido no sistema de polpação.

Dahl verificou que a introdução do sulfeto de sódio no licor de cozimento catalisa as reações de deslignificação e promove maior retenção das pentosanas na polpa, produzindo polpas mais resistentes (SMOOK, 1994; BRITT, 1964 apud SEGURA, 2012).

De acordo com Rydholm (1965), diversas fábricas que operavam com o processo soda logo o substituíram pelo novo processo, chamado de kraft ou sulfato.

Gomide (1979) afirma que apenas as estruturas de lignina reagem com o sulfeto durante o cozimento kraft. A maior parte dos reagentes químicos empregados é consumida em reações de neutralização de compostos ácidos orgânicos formados durante as reações de degradação dos carboidratos.

O processo kraft de polpação tem por objetivo a individualização das fibras pela dissolução da lignina presente na madeira. O processo kraft envolve o tratamento de cavacos de madeira com solução aquosa de hidróxido de sódio e sulfeto de sódio a elevadas temperaturas (de 145°C a 175°C) por períodos de tempo que variam de 1 a 6 horas (DUARTE, 2006).

Silva Júnior (2005) destacam as vantagens do processo de polpação kraft, sendo elas:

- qualidade da polpa celulósica;
- eficiência na recuperação dos reagentes químicos;

- grande flexibilidade com relação às espécies de madeira;
- autossuficiência na produção de energia.

Entretanto, o processo kraft, apresenta algumas desvantagens, sendo as principais:

- alto custo de investimento na construção da fábrica;
- problema de odor devido aos gases produzidos;
- baixo rendimento de polpação;
- alto custo de branqueamento.

A deslignificação durante o processo kraft convencional pode ser dividida em três fases (KLEPPE, 1970; SJÖSTRÖM, 1981; OLM; SANDSTRÖM; TEDER, 1988; GULLICHSEN, 1999; ARAÚJO, 2000 apud VASCONCELOS, 2005):

Fase inicial: ocorre principalmente durante a fase de impregnação do cozimento, em temperaturas abaixo de 140°C e é controlada principalmente pela difusão. A lignina não se decompõe rapidamente nesta fase; apenas aqueles fragmentos de ligninas que são pequenos suficientemente para serem dissolvidas são extraídos da camada S2 da parede celular, com isso, pouca quantidade de lignina é dissolvida (20-25% do total) enquanto o teor de carboidratos diminui rapidamente. Nessa fase, cerca de 60% da carga alcalina é consumida nos cozimentos convencionais.

Fase principal: Acima de determinada temperatura – alguns autores estabelecem 140°C, enquanto outros citam 150°C – a taxa de deslignificação aumenta consideravelmente, sendo acelerada proporcionalmente com o aumento da temperatura, enquanto que a porcentagem de carboidratos e a concentração de álcali no licor de cozimento diminuem apenas ligeiramente; a taxa de deslignificação se mantém alta durante esta fase, até que cerca de 90% de toda a lignina tenha sido dissolvida, ou seja, cerca de 70% de toda a lignina é dissolvida durante esta fase. A dissolução se inicia na camada S2 da parede celular e progride até a lamela média. A deslignificação principal é fortemente dependente das concentrações de íons OH⁻ e HS⁻ e da temperatura, sendo maior a deslignificação com maiores concentrações e/ou temperatura do cozimento. A taxa de concentração dos reagentes diminui a medida que a concentração de lignina dissolvida aumenta, sendo que essa razão de deslignificação também é menor em cavacos de maior espessura, já que um dos fatores a regular a taxa de deslignificação é a difusão.

Fase residual: a deslignificação é mais lenta que na fase anterior, com diminuição da deslignificação, enquanto que a degradação dos carboidratos aumenta. Essa fase pode ser regulada até certo ponto através de variações na carga alcalina e na temperatura de cozimento.

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

2.2.1 Processos modificados

Nos últimos anos, pressões ambientais e a necessidade de aumentar a deslignificação das polpas, melhorando a eficiência do processo e a qualidade da polpa produzida, levaram ao desenvolvimento de novas tecnologias de polpação, os chamados cozimentos modificados (SEGURA, 2012).

As modificações do processo kraft estão baseadas numa melhor distribuição de energia e carga alcalina (BASSA, 2006). De acordo com Silva Jr. e McDonough (2002) as principais modificações do processo kraft têm sido direcionadas no sentido de aumentar o rendimento e a intensidade de deslignificação, permitindo a implantação de sequências de branqueamento ECF e TCF, reduzindo assim os impactos ambientais.

Segundo Bassa (2002), inúmeras tecnologias para modificação do processo kraft estão disponíveis, tanto para processos contínuos quanto para descontínuos. Dentre os descontínuos, destacam-se o RDH (Aquecimento Rápido por Deslocamento), o SuperBatch™ e o EnerBatch. Já entre os contínuos, podem ser destacados o MCC (Cozimento Contínuo Modificado), o EMCC (Cozimento Contínuo Modificado Estendido), o ITC (Cozimento Isotérmico) e o Lo-Solids® (Cozimento com baixo teor de sólidos).

Estudos de Marcoccia e Poulin (1996 apud SEGURA, 2012) demonstraram que os sólidos da madeira dissolvidos no licor de cozimento causam aumento do

consumo alcalino, diminuição da viscosidade, resistência, branqueabilidade e alvura da polpa produzida.

Segundo Bassa (2006) os processos de polpação vêm sofrendo diversas modificações que visam melhorar sua eficiência, tanto em termos de rendimento como de propriedades da polpa celulósica obtida. Essas modificações do processo kraft têm como base uma melhor distribuição de energia e da carga alcalina, bem como a utilização de aditivos que atuem sobre a cinética de deslignificação.

Segundo Bassa (2002) algumas das alternativas mais frequentemente utilizadas (no todo ou em parte) para cozimentos kraft modificados são:

- impregnação com licor negro;
- baixo teor de sólidos no licor de cozimento;
- perfil alcalino ótimo (distribuição da carga alcalina);

Ainda de acordo com este autor, a seletividade do cozimento (expressa pela viscosidade intrínseca da polpa celulósica a um determinado índice kappa) é também melhorada pela divisão do licor branco em duas correntes: uma com teor elevado de sulfidez, a ser introduzida no início do cozimento para minimizar a degradação dos polissacarídeos, e outra, com elevado teor de íons hidroxilas. Adicionalmente, a extração frequente do licor negro durante o cozimento em paralelo com a introdução de licor proporciona uma redução no teor de sólidos no licor (que contem lignina e polissacarídeos dissolvidos) possibilitando uma maior deslignificação e, conseqüentemente, a utilização de temperaturas mais baixas de cozimento, o que proporciona maiores rendimento e viscosidades. Também, em digestores contínuos, o aproveitamento da zona de lavagem para prosseguir a deslignificação, por utilização de licor em contracorrente a temperaturas próximas da temperatura de cozimento, permite diminuir a temperatura global do digestor sem prejudicar a produtividade.

De acordo com Olm, Sndström e Teder, 1988 e Irvine e Clark (1994), apud Bassa 2002, os processos modificados de polpação apresentam alguns princípios:

- A concentração de álcali deve ser nivelada, sem excessos, durante o cozimento, em oposição à alta concentração de álcali que gradualmente diminui durante o cozimento, permitindo que maior teor de álcali fique disponível para as deslignificações principal e residual.

- A concentração de HS^- deve ser tão alta quanto possível, especialmente no início da fase principal de deslignificação. Isso favorece uma deslignificação mais rápida e mais seletiva durante a fase de deslignificação principal.
- A concentração de lignina dissolvida e íons sódio no licor devem ser tão baixa quanto possível, especialmente na fase final do cozimento kraft. A diminuição da concentração de lignina e íons sódio aumenta a taxa de deslignificação, mas não afeta a degradação dos carboidratos.
- A temperatura deve ser baixa, principalmente nas fases inicial e final do cozimento, por causa da baixa seletividade da polpação nessas fases. A taxa de despolimerização final dos polissacarídeos aumenta mais rápido com o aumento da temperatura que a taxa de deslignificação e, assim, uma baixa temperatura de polpação melhora a seletividade da polpação.

Devido a maior uniformidade do cozimento, o processo modificado resultou em um aumento no rendimento de 0,5 a 1% para madeira de coníferas, tendo resultados melhores para folhosas (COURCHENE, 1998, apud SILVA JÚNIOR; BRITO, 2008).

2.2.1.1 Processo SuperBatch™

O processo de polpação kraft SuperBatch™ é realizado em digestores descontínuos coordenados. Este processo se caracteriza pela extração e injeção simultânea de licores de cozimento com concentrações e temperaturas diferentes. Parte dos licores extraídos é armazenada em acumuladores de licor para utilização em cozimentos subsequentes (SILVA JÚNIOR; BRITO, 2008).

A sequência de atividades nos processos descontínuos por deslocamento pode ser assim resumida (WECKROTH; HILJANEN, 1996; UUSITALO; SVEDMAN, 1999; OLM et al., 2000, apud VASCONCELOS, 2005):

- **Carregamento dos cavacos:** o método de carregamento pode influenciar na uniformidade da coluna de cavacos dentro do digestor resultando em dificuldades na circulação do licor e não uniformidade da carga alcalina e transferência de calor dentro do digestor. O sistema de carregamento normalmente utilizado (“steam packer”) usa baixa pressão, favorecendo a boa acomodação dos cavacos e forçando a compactação dos mesmos,

permitindo, com isso, uma maior carga de madeira por batelada, que varia de 10 a 25%. Simultaneamente, o ar é extraído através das peneiras de circulação do licor; sem a evacuação do ar, a entrada do digestor pode ficar obstruída.

- ***Injeção do licor negro morno (impregnação):*** a impregnação dos cavacos é feita com o licor proveniente da fase de licor negro quente proveniente de cozimentos anteriores. A temperatura nessa fase é de 80 à 90°C e as reações de cozimento ainda não se iniciaram. Eventualmente, pode ser utilizado licor branco, com a função de ajustar a carga alcalina aplicada e o pH do licor de impregnação.
- ***Injeção do licor negro quente:*** nesse estágio o licor negro morno é substituído por licor negro quente, proveniente da fase de cozimento de bateladas anteriores. O propósito dessa fase é aumentar a temperatura dos cavacos e fazer com que ocorram reações entre a madeira e os reagentes de cozimento, antes que licor branco seja inserido no sistema. As reações químicas entre madeira e licor negro, provavelmente não se iniciam antes deste estágio.
- ***Injeção do licor branco quente:*** licor branco, submetido a um pré-aquecimento, é injetado no digestor visando completar a carga alcalina definida para o cozimento.
- ***Aquecimento e cozimento:*** nessa etapa o sistema é elevado até a temperatura máxima de cozimento e mantido nessa temperatura, até que a deslignificação desejada seja atingida. Visto que a temperatura da etapa anterior está próxima da temperatura de cozimento, o tempo de aquecimento é curto, por volta de 20 minutos. Devido à alta relação licor-madeira e a uniformidade de aplicação da carga alcalina dentro de todo o digestor, se tem um cozimento uniforme durante toda essa fase. Em algumas linhas de polpação mais novas, é possível se aplicar álcali durante a polpação.
- ***Deslocamento final (lavagem):*** quando se alcança o fator H estabelecido, o cozimento é finalizado. O licor negro é retirado do digestor a partir do topo, ao mesmo tempo em que é feito o bombeamento do filtrado da lavagem para o fundo do digestor para que o conteúdo do digestor seja resfriado e as reações de cozimento sejam interrompidas. O licor proveniente do fim da fase de cozimento é direcionado para acumuladores de licor negro que tem por

objetivo evitar a perda de calor e será utilizado em cozimentos subsequentes, mais especificamente na fase de licor negro quente.

- **Descarga do digestor:** o conteúdo do digestor, agora abaixo de 100°C, é descarregado através da diluição e bombeamento do seu conteúdo, com uma consistência de 5-6%, evitando que as fibras sejam danificadas e conseqüentemente resultando em menores resistências das mesmas a exemplo do que ocorre no cozimento descontínuo convencional.

A substituição por deslocamento de diferentes licores de cozimento propicia condições mais favoráveis de homogeneidade durante o cozimento, além de requerer a operação do digestor hidraulicamente cheio, favorecendo a produção. Esse fator provoca aumento na relação licor:madeira, o que é favorável à seletividade, pois, embora a carga alcalina aplicada seja a mesma, a concentração do licor é menor em comparação ao processo convencional. Outro benefício diz respeito à uniformidade do processo, isto é, a concentração de produtos químicos é mais uniforme no interior do digestor e o uso de um estágio de impregnação favorece a penetração e a difusão do licor na madeira (HAKAMAKI; KOVASIN, 1991; MACIEL, 1996, apud VASCONCELOS, 2005).

Fantuzzi Neto (1997) comenta que o objetivo do desenvolvimento dos processos descontínuos modificados foi reduzir o consumo de energia, mas além de se ter alcançado esse objetivo, as seguintes melhorias básicas foram introduzidas aos processos: aquecimento rápido, possibilidade de deslignificação intensiva, rendimento mais alto, polpa mais uniforme, com melhores resistências à tração, ao rasgo e ao estouro, utilização de descarga a frio, concentração mais alta do licor negro para a evaporação, reduzindo o consumo de vapor e menor teor de rejeitos.

Os processos de cozimento SuperBatch™ e RDH incorporam modificações de processos iniciais devido ao uso de dois estágios de impregnação com licor negro. Estes dois estágios de impregnação com licor negro resultam em uma elevada concentração de íons hidrossulfito (SILVA JÚNIOR; BRITO, 2008).

Em alguns casos licores pretos extraídos e ricos em compostos dissolvidos da madeira são utilizados na etapa de impregnação dos cavacos. Isso tem permitido usar a alcalinidade residual, seus íons hidrosulfeto (abundantes) e hidroxilas (menos abundantes), ainda presente no licor preto. Os HS⁻ são considerados “protetores” dos carboidratos, sendo a causa do sucesso do processo kraft em relação ao processo soda (que não os dispõe em sua química). Mesmo que fragmentos

maiores de xilanas venham a se reprecipitar nessa fase de impregnação dos cavacos, restará aos pesquisadores descobrir formas de evitar que esses fragmentos sejam removidos pelo cozimento kraft subsequente à impregnação (FOELKEL, 2009).

De acordo com Silva Júnior e Brito (2008) a carga alcalina em cozimentos com deslocamento de licor é redistribuída de tal forma que a maior parte do álcali efetivo é aplicada no estágio de cozimento. O consumo de álcali é menor devido à neutralização e remoção de produtos oriundos das reações de degradação da lignina e dos carboidratos nos estágios de pré-tratamento, isto é, antes do estágio de cozimento.

Segundo Silva Júnior e Brito (2008) as modificações aplicadas no processo SuperBatch™ melhoram a remoção de lignina e economia de energia devido a redução da necessidade de aquecimento.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

No presente estudo foram utilizados colmos da espécie *Bambusa vulgaris* provenientes da coleção existente no Centro Experimental de Campinas do Instituto Agrônômico, localizado na Avenida Barão de Itapura, 1481 – Campinas/SP, latitude: 22°53'31"S e longitude: 47°03'51"W. Deve-se salientar que as touceiras dessa espécie foram obtidas através de sementes e não por via assexuada como normalmente ocorre em bambu. Não se identificou a idade dos colmos, foram evitados os colmos próximos à borda da touceira por serem os mais novos e por esse motivo imaturos.

Os colmos coletados foram transportados para o Laboratório de Química, Celulose e Energia – LQCE do Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ – Universidade de São Paulo. No LQCE os colmos foram reduzidos a cavacos com auxílio de um picador de disco DEMUTH acoplado a tomada de força de um trator. Os cavacos foram submetidos a um processo de classificação para remoção de finos, cascas e cavacos com nós e de grandes dimensões. Após esta etapa os mesmos foram secos ao ar, homogeneizados, acondicionados em sacos plásticos em câmara fria.

3.2 Métodos

3.2.1 Densidade básica

A densidade básica foi determinada através do método do máximo teor de umidade (FOELKEL; BRASIL; BARRICHELO, 1971), tomando-se 10 amostras de aproximadamente 20g de cavacos cada. Já a densidade aparente dos cavacos foi determinada com a utilização de 10 amostras de cavacos pelo método volumétrico conforme descrito por Rezende et al. (1988), de acordo com a seguinte equação:

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

Onde:

ρ_{ap} = densidade aparente;

m_{ap} = massa seca em estufa a 105 °C dos cavacos;

V_{ap} = volume aparente dos cavacos secos ao ar.

3.2.2 Composição química

Para o material em estudo foi determinado o teor de extrativos totais, através de três extrações consecutivas utilizando como solvente uma mistura de álcool tolueno: álcool etílico (2:1), álcool etílico e água quente, respectivamente. Para a determinação do teor de lignina foi realizada uma hidrólise ácida com ácido sulfúrico em duas etapas: uma a baixa temperatura e alta concentração e a outra etapa a alta temperatura e baixa concentração, sendo o teor de lignina insolúvel determinação pela massa resultante e o teor de lignina solúvel determinado através de espectrofotômetro. O teor de holocelulose foi determinado por diferença. Essas determinações seguiram as metodologias utilizadas no Laboratório de Química, Celulose e Energia (LQCE) do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, e estão descritas de maneira detalhada no apêndice. O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma TAPPI T 211 om – 02. A serragem dos cavacos do bambu foi obtida em moinho de laboratório, após a classificação da mesma em um conjunto de peneira de 40 e 60 mesh; as análises foram realizadas em triplicatas.

3.2.3 Caracterização morfológica das fibras

Dos cavacos foram retirados cerca de 50 fragmentos, para maceração pelo processo nítrico-acético, o qual se constitui em submeter o material a ser dissociado a um tratamento com solução de ácido acético, ácido nítrico e água (5:2:1) aquecida em banho-maria a 100 °C por um período de tempo suficiente para que as fibras sejam individualizadas. Após o término do tratamento, o material foi lavado em água destilada. Com o material dissociado foram montadas 10 lâminas. Com o auxílio do software Image Pro Plus foram medidos o comprimento, a largura e o diâmetro do lume e a espessura de 10 fibras, totalizando 100 medições.

Com os valores médios das dimensões das fibras foram calculadas as seguintes relações:

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

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

$$\text{Índice de enfieltramento} = \frac{C}{L}$$

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

Onde: C = comprimento da fibra; L = largura da fibra; EP = espessura da parede; DL = diâmetro do lume.

3.2.4 Impregnação aquosa

Foi realizado um estudo de impregnação aquosa com relação sólido:líquido 16:1 testando as temperaturas de 50, 70 e 90°C durante 5 horas pesando-se os cavacos drenados a cada 15 minutos para avaliar a absorção de água. Também se avaliou o efeito da temperatura de 110°C sendo que para considerados os tempos de 15 minutos, 1, 2 e 5 horas; posteriormente foram avaliados os teores de extrativos totais e lignina dos cavacos oriundos das temperaturas 50, 70, 90 e 110°C nos tempos de 1 e 5 horas.

Foi determinado o teor de glucose nos extratos aquosos nas temperaturas de 50, 70, 90 e 110°C, as amostras foram hidrolisadas com ácido trifluoroacético 2N, por 2 horas e depois foram analisadas em cromatógrafo líquido com detector de amperometria pulsada.

3.2.5 Processo convencional

Para a realização dos cozimentos convencionais foi utilizado um digestor de circulação forçada da marca Technological Solutions Integrated, com dois vasos, com capacidade de 10 litros cada e trocadores de calor para aquecimento. Em cada cozimento foi utilizada uma amostra de cavacos equivalente a 800g absolutamente secos (a. s.).

A carga alcalina foi ajustada visando a obtenção de polpa com número kappa de 58 ± 2 . As condições do cozimento estão apresentadas na Tabela 1. Após o cozimento convencional foi analisado o efeito, nas características da polpa, da adição de um estágio de pré-extração aquosa.

Tabela 1 – Condições de cozimentos para o processo convencional

Parâmetros	Condições
Alcali ativo (como NaOH), %	*
Sulfidez, %	25
Relação licor/madeira, litros/kg	4:1
Temperatura máxima, °C	166
Tempo de Aquecimento, minutos	90
Tempo de cozimento, minutos	60

Ao final de cada cozimento foi coletada uma amostra de licor negro para análise. A polpa foi lavada em água corrente por uma hora e 20 minutos. A polpa e o licor obtido em cada cozimento foram analisados de acordo com os parâmetros e metodologias descritos na Tabela 3.

3.2.6 Processo SuperBatch™

Para a simulação do processo SuperBatch™ utilizou-se digestor laboratorial da marca Technological Solutions Integrated, utilizando 1 dos vasos como digestor e o outro vaso para estocagem de licor/água, ambos dotados de aquecimento elétrico e circulação forçada; adicionalmente, se tem 1 bomba dosadora para a realização das transferências de licores.

O processo SuperBatch™ pode ser resumido em quatro estágios principais:

- Impregnação com licor negro morno;
- Substituição por licor negro quente;
- Injeção de licor branco quente;
- Deslocamento final (lavagem) e descarga.

Os parâmetros utilizados nos cozimentos SuperBatch™ estão descritos na Tabela 2. Um esquema das diferentes etapas e seus respectivos tempos e temperaturas são apresentados na Figura 3.

Tabela 2 – Condições do cozimento SuperBatch™ em cada uma das fases

Parâmetros do Cozimento	Impregnação		LNQ		Cozimento		Lavagem 1		Lavagem 2	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2
Álcali total, %	20	-	20	-	60	-	-	-	-	-
Sulfidez, %	50	-	40	-	25	-	-	-	-	-
Tempo, minutos	5	25	20	10	15	65	15	15	15	15
Temperatura, °C	80	90	90	120	120	140	140	80	80	80

LNQ = Licor Negro Quente

F1 = fase de transferência dos licores e rampa para se atingir a temperatura especificada

F2 = fase nas condições estabelecidas

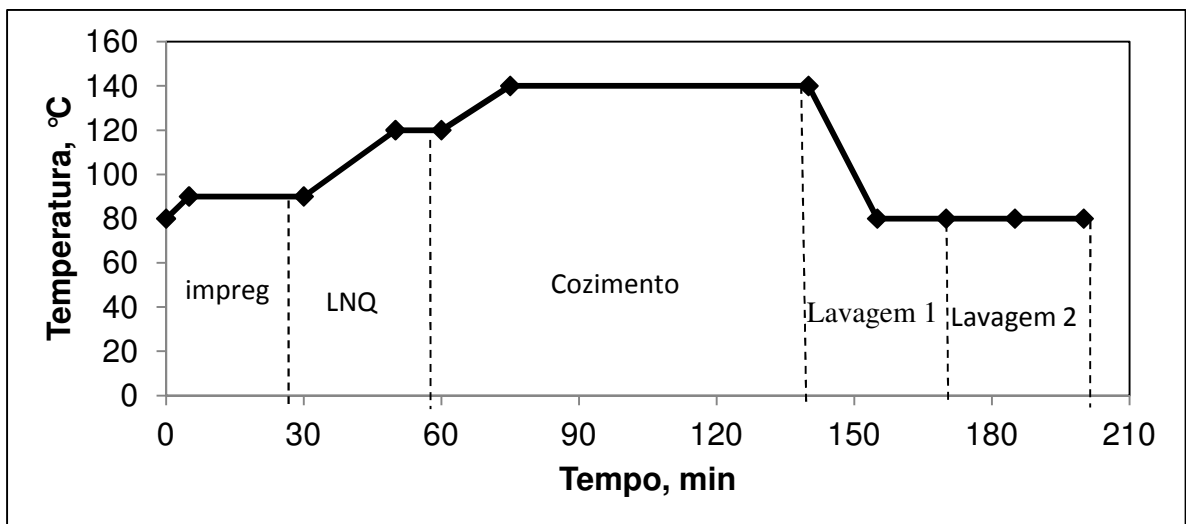


Figura 3 – Esquema do cozimento SuperBatch™

Após o cozimento SuperBatch™ foi analisado o efeito, nas características da polpa, da adição de um estágio de impregnação aquosa.

Entre os parâmetros iniciais de processo que foram avaliados, além do tempo x temperatura, a carga alcalina total aplicada no cozimento. Para avaliação dos cozimentos foram considerados os parâmetros descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros determinados em cada cozimento

Parâmetro	Norma
Rendimento bruto	Relação entre peso a. s. de celulose e peso a. s. de madeira
Rendimento depurado	Relação entre peso a. s. de celulose depurada e peso a. s. de madeira
Teor de rejeitos	Relação entre peso a. s. de rejeitos (material retido em peneira com fenda de 0,5 mm de depurador laboratorial) e peso a. s. de madeira
Número kappa	Tappi Methods – T236cm-85
Ácidos hexenurônicos	TAPPI Methods – T282 pm-07
Teor de sólidos no licor negro	Tappi Methods – T625cm-85
Álcali residual no licor negro	Tappi Methods – T625cm-85
Alvura	ISO 2470

Para análise dos resultados utilizou-se estatística descritiva e comparações com a literatura existente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Densidade básica

A densidade básica é um importante parâmetro para avaliação da qualidade da madeira, sendo a mesma altamente correlacionada com os parâmetros dos processos de polpação e com as propriedades mecânicas da madeira (MITCHEL, 1958 *apud* Segura 2012). Segundo Segura (2012) a densidade aparente é um parâmetro bastante direto e simples para a indústria de celulose e se relaciona com a capacidade de produção de uma fábrica.

Os valores de densidade básica e aparente dos cavacos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores médios de densidade básica e aparente dos cavacos de *Bambusa vulgaris*

Parâmetro	Média	Desvio Padrão	C V (%)
Densidade aparente, g.cm ⁻³	0,151	0,002	1,13
Densidade básica, g.cm ⁻³	0,504	0,011	2,12

Os cavacos utilizados nesse trabalho apresentam densidade básica de 0,504g.cm⁻³ valor este que pode ser considerado típico para a espécie em questão.

A densidade básica está de acordo com a encontrada por Vera Fernández (2010) que encontrou o valor de 0,552 g.cm⁻³ e a encontrado por Bonfatti Junior com o valor de 0,494 g.cm⁻³.

4.2 Composição Química

Os processos químicos de polpação são influenciados pela composição química da matéria-prima, a qual é determinante na eficiência do processo de polpação, influenciando no consumo de reagentes, no rendimento em polpa celulósica, na quantidade de sólidos gerados e outros fatores. Os valores da composição química dos cavacos de *Bambusa vulgaris* estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química dos cavacos de *Bambusa vulgaris*

Parâmetros	Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação (%)
Lignina total, %	23,62	0,28	1,19
Lignina residual, %	21,76	0,30	1,38
Lignina solúvel, %	1,86	0,07	3,76
Extrativos totais, %	8,08	0,33	4,08
Holocelulose, %	68,30	0,36	0,53
Cinzas, %	2,05	0,004	0,19

Os resultados estão de acordo com os encontrados por Vera Fernández (2010) que encontrou para *Bambusa vulgaris* teores de holocelulose, lignina total, lignina insolúvel, lignina solúvel, extrativos, e cinzas com valores de 67,63; 22,91; 22,03; 0,88; 9,46 e 1,05% respectivamente; enquanto Bonfatti Júnior (2010) encontrou os valores de 66,28% de holocelulose; 22,17% para lignina total; 21,29% lignina insolúvel; 0,88% de lignina solúvel e 11,55% de extrativos totais.

4.3 Morfologia de fibras

Na produção de papel a partir de polpa celulósica, as fibras são os elementos estruturais fundamentais e os principais responsáveis pelas propriedades físico-mecânicas, tanto das polpas celulósicas como dos papéis produzidos. As dimensões das fibras, fundamentalmente, comprimento, largura e espessura da parede, estão relacionadas com as propriedades físico-mecânicas das polpas e papéis produzidos (VASCONCELOS, 2005). Na tabela 6 estão apresentados os resultados da morfologia de fibras.

Tabela 6 - Dimensões e relações morfológicas das fibras de *Bambusa vulgaris*

Dimensões e Relações	Média	Desvio padrão	C V (%)
Comprimento, mm	2,95	0,631	21,382
Largura, μm	17,47	5,587	31,987
Diâmetro do lume, μm	7,42	4,320	58,251
Espessura de parede, μm	5,03	1,763	35,071
Fração parede, %	57,54
Coefficiente de flexibilidade, %	42,46
Índice de enfieltramento	168,84
Índice de Runkel	1,36

Nota: Sinal convencional utilizado:

.. Não se aplica dado numérico

Comparada com as fibras de madeiras folhosas e coníferas, as fibras de bambu possuem, em relação ao *Eucalyptus grandis*, largura semelhante, com cerca do dobro da espessura da parede e metade do diâmetro do lúmen, e comprimento próximo ao das fibras do *Pinnus elliottii* (GOMIDE, 1988). Segundo Gomide (1988) as fibras de *Bambusa vulgaris* são longas, estreitas, com lume pequeno e paredes relativamente espessas.

Com relação as dimensões das fibras, os valores médios encontrados estão em consonância com os obtidos por Gomide (1988) para *Bambusa vulgaris*: 2,8mm de comprimento, 17,2µm de largura, 6,6 µm de diâmetro do lúmen e 5,2 µm de espessura da parede; e por Vera Fernández (2010) 3,0mm de comprimento, 22,3µm de largura, 10,2 µm de diâmetro do lúmen e 6,1 µm de espessura da parede.

De acordo com Mogollón e Aguilera (2002 *apud* Vera Fernández, 2010), para valores de fração parede superiores a 40% assume-se que as fibras apresentam boa flexibilidade. O coeficiente de flexibilidade indica o grau de colapso (achatamento) que as fibras sofrem durante o processo de fabricação do papel, quanto maior seu valor, mais flexível será a fibra, ocorrendo maiores possibilidades de ligações entre as mesmas, o que tende a aumentar as resistências à tração e ao estouro (SHIMOYAMA; WIECHETECK, 1993 *apud* VERA FERNÁNDEZ, 2010). Segundo Mogollón e Aguilera (2002 *apud* VERA FERNÁNDEZ, 2010), para o índice de enfeltramento, quanto maior o seu valor, maior resistência ao rasgo terá o papel, sendo assim muito bom o valor encontrado para *Bambusa vulgaris* Schrad., já que confere uma excelente flexibilidade e boa resistência ao papel produzido.

4.4 Impregnação aquosa

A adequada impregnação favorece o processo de polpação e a seletividade do processo, resultando em polpas com alta deslignificação e com baixa degradação dos carboidratos.

A Figura 4 apresenta o comportamento de absorção de água nas diferentes temperaturas durante 5 horas.

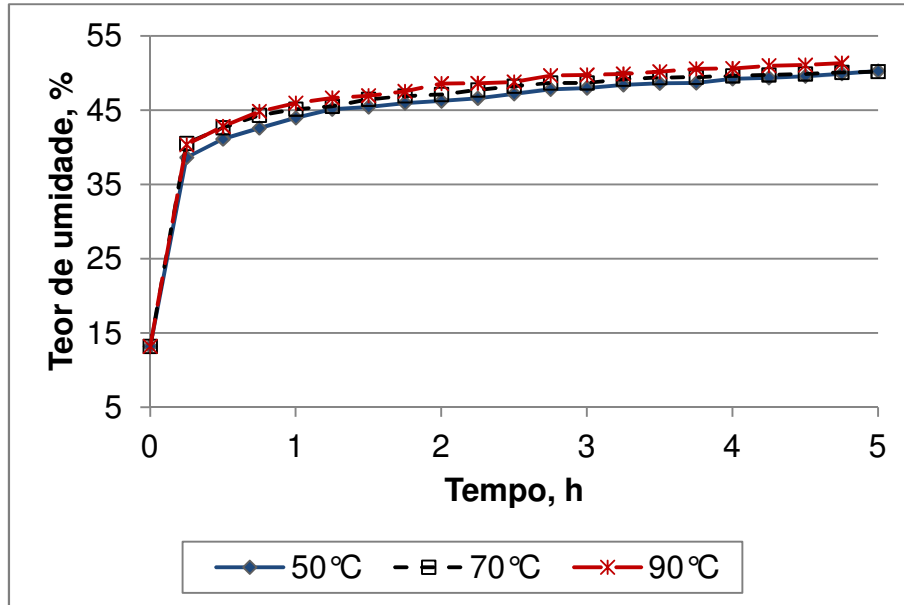


Figura 4 - Absorção de água dos cavacos de *Bambusa vulgaris*

Os resultados apresentados na figura 4 e 5 mostram que a maior taxa de impregnação é obtida no tempo de 15 minutos, no entanto através da observação visual percebeu que a impregnação foi muito heterogênea, desta forma optou-se por uma impregnação realizada por uma hora. Em períodos de tempo superiores à uma hora ainda há um aumento da impregnação, porém com menor intensidade.

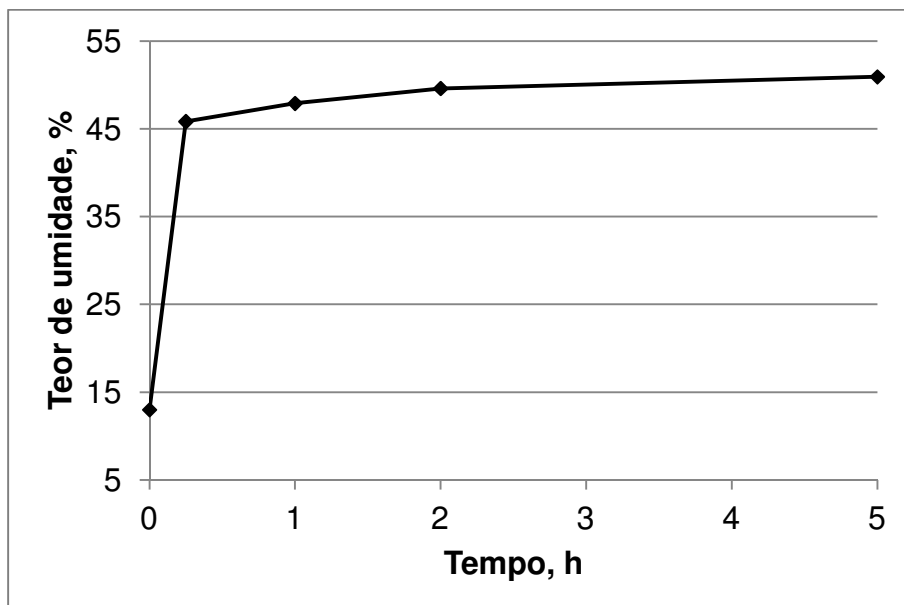


Figura 5 - Absorção de água dos cavacos de *Bambusa vulgaris* a 110°C

O tempo de impregnação é uma variável que determina as dimensões dos vasos de impregnação em escala industrial para um determinado nível de produção

de polpa celulósica; quanto maior o tempo de impregnação, maior deve ser o vaso e maior será o investimento necessário para sua implantação. Considerando-se estes aspectos e associando-os aos resultados apresentados nas figuras anteriores, considere-se que a etapa de impregnação aquosa deve ser conduzida por 1 hora.

Visando avaliar se a etapa de impregnação aquosa proporcionou alterações na composição química dos cavacos, os cavacos tratados por 1 hora e 5 horas. Após essa etapa os mesmos foram analisados conforme tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros avaliados após impregnação aquosa

Parâmetros, %	50°C		70°C		90°C		110°C	
	1 h	5 h	1 h	5 h	1 h	5 h	1 h	5 h
Teor de umidade	47,51	52,47	49,3	52,84	50,07	53,33	47,94	50,96
Rendimento	97,75	98,12	98,03	96,41	97,79	96,71	94,32	94,48
Extrativos totais	6,86	6,28	6,35	6,05	5,67	5,69	6,76	6,07
Lignina Total	24,18	24,47	23,14	22,94	24,31	23,61	23,04	24,03
Lignina residual	23,31	23,58	22,32	21,97	23,37	22,71	22,11	22,96
Lignina solúvel	0,87	0,89	0,82	0,97	0,94	0,90	0,93	1,07

Os resultados apresentados na tabela 6 mostram que o tempo, independentemente da temperatura, não proporcionou alterações significativas no teor de extrativos e dos três tipos de ligninas determinadas. Estes resultados confirmam que o período de 1 hora para a impregnação aquosa é o mais adequado para os objetivos que este tratamento se propõe.

Com relação ao efeito da temperatura na etapa de impregnação aquosa, os resultados encontram-se apresentados na figuras 6 e 7.

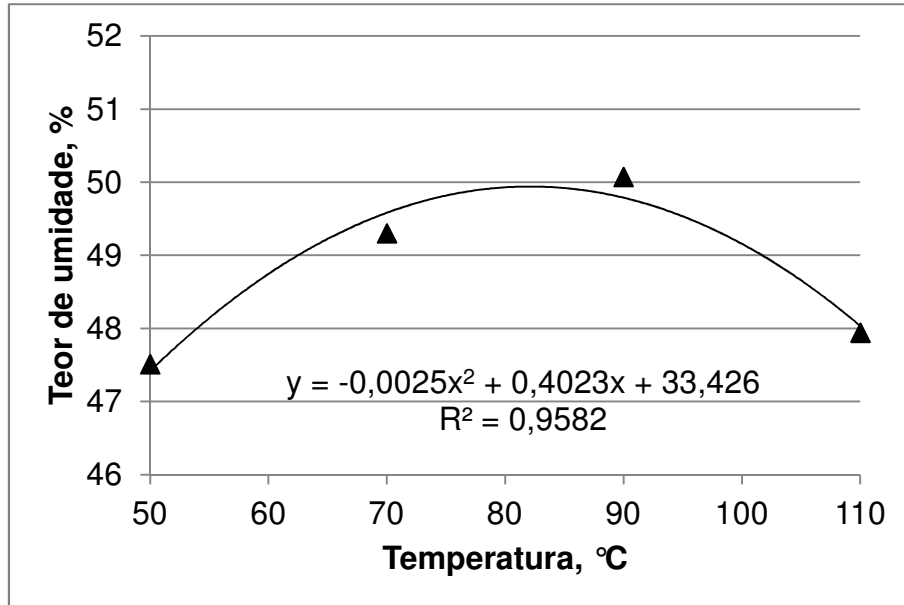


Figura 6 - Teor de umidade dos cavacos de *Bambusa vulgaris* em diferentes temperaturas durante 1 hora

Por meio da regressão calculou-se o ponto máximo de teor de umidade nos cavacos, o qual ocorre quando os mesmos são submetidos a impregnação aquosa por 1 hora a 80,46°C.

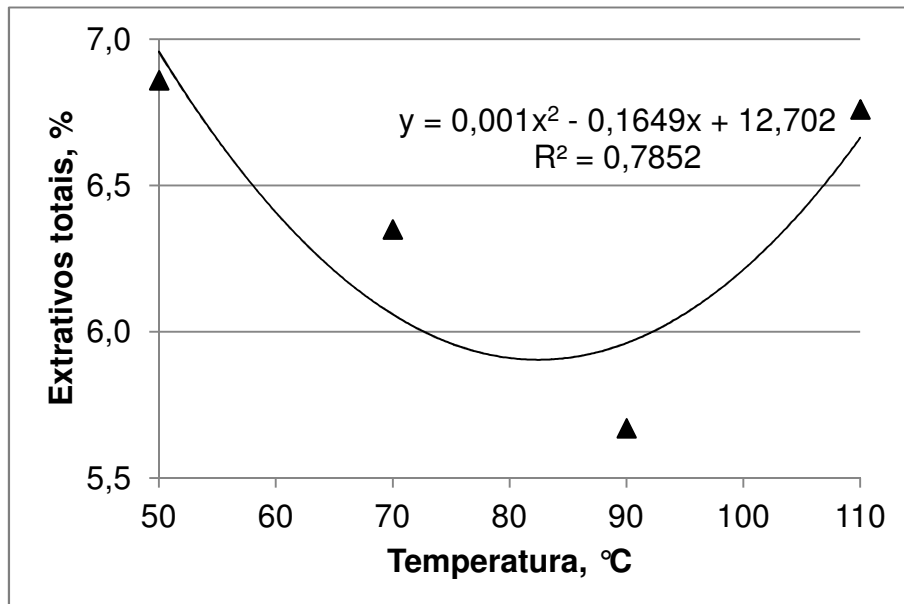


Figura 7 - Teor de extrativos totais em *Bambusa vulgaris* à diferentes temperaturas durante 1 hora

A análise e interpretação dos resultados obtidos para o teor de extrativos dos cavacos, indica que os menores percentuais são obtidos quando os cavacos são tratados em temperatura de 82,45°C por um período de 1 hora. Para uma maior

facilidade de operação foi considerada a temperatura de 80 °C para a impregnação aquosa.

A impregnação aquosa teve como objetivo melhorar a impregnação dos cavacos, levando também a uma melhora na uniformidade do cozimento e na remoção de extrativos solúveis; os quais consomem reagentes durante o processo. Por ser o amido o extrativo solúvel mais abundante um polímero de glucose, analisou-se o teor deste monômero nos extratos da impregnação aquosa. Os resultados dos teores de glucose estão apresentados na figura 8.

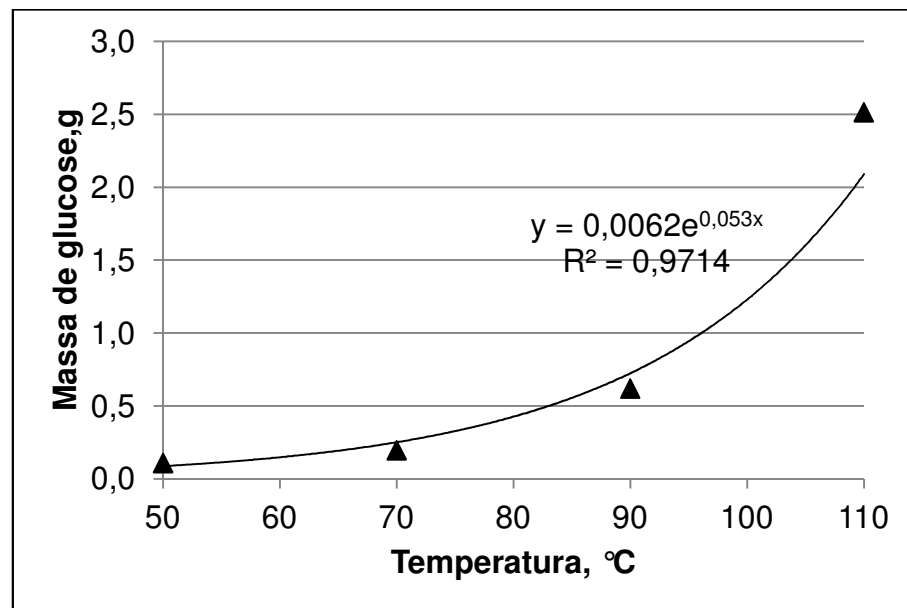


Figura 8 - Teor de glucose nos extratos aquosos

Observa-se na Figura 8 que com o aumento da temperatura ocorreu o aumento do teor de glicose no filtrado da etapa de impregnação aquosa. Considerando-se a relação água/cavaco e a massa de cavacos utilizada no trabalho, através do balanço de massa, a etapa de impregnação aquosa conduzida por 1 hora a 80 °C permitiu a obtenção de 1,72kg de glucose/t de cavacos.

4.5 Processo de polpação

Entre as principais variáveis que devem ser consideradas na avaliação de processos de polpação está o rendimento. O rendimento expressa a quantidade de polpa celulósica obtida ao final do processo de polpação em comparação com a matéria-prima alimentada inicialmente (VERA FERNÁNDEZ, 2010).

Na figura 9 estão apresentados os resultados de rendimento bruto considerando a etapa de impregnação aquosa e os processos de polpação convencional e SuperBatch™.

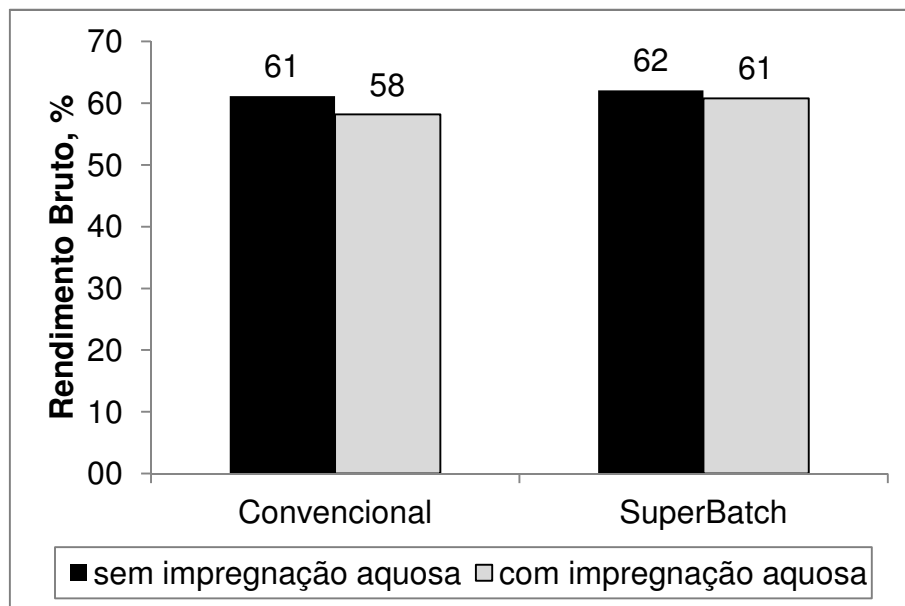


Figura 9 - Rendimento bruto dos cavacos de *Bambusa vulgaris*

A figura 9 mostra que o maior rendimento bruto na produção de polpa celulósica a partir de *Bambusa vulgaris* foi obtido pelo processo SuperBatch™. Para ambos os processos a adição da etapa de impregnação aquosa reduziu o rendimento. No entanto se considerarmos o rendimento da etapa de impregnação aquosa (98%), o rendimento bruto do processo convencional é de 59,4% e 62,1% para o processo SuperBatch™.

Com relação ao rendimento bruto, Vasconcelos (2005) encontrou para *Pinus taeda* os valores de 55,38% para o processo kraft convencional e 57,79% para o processo SuperBatch™ e número kappa de 56,2 e 56,8 respectivamente.

Vera Fernández (2010) obteve para *Bambusa vulgaris* rendimento bruto de 54,13% para processo soda-AQ convencional com número kappa de 50,92.

Em termos industriais além do rendimento bruto é importante de determinar o rendimento depurado; a diferença entre o rendimento bruto e depurado representa o teor de rejeito; estas informações são importantes em escala industrial para o dimensionamento das etapas de depuração da polpa celulósica.

O rendimento depurado é um parâmetro importante para o fabricante de polpa celulósica tendo em vista os aspectos econômicos relacionados ao consumo de madeira, uma vez que a matéria-prima é responsável pela maior parte do custo de

produção de polpa. Além do aspecto negativo relacionado ao maior consumo específico de madeira devido ao menor rendimento, baixo rendimento gera também maior teor de sólidos no licor podendo resultar numa menor taxa de produção, caso a caldeira de recuperação esteja trabalhando em seu limite de projeto (ALMEIDA, 2003). Os resultados de rendimento depurado estão apresentados na Figura 10.

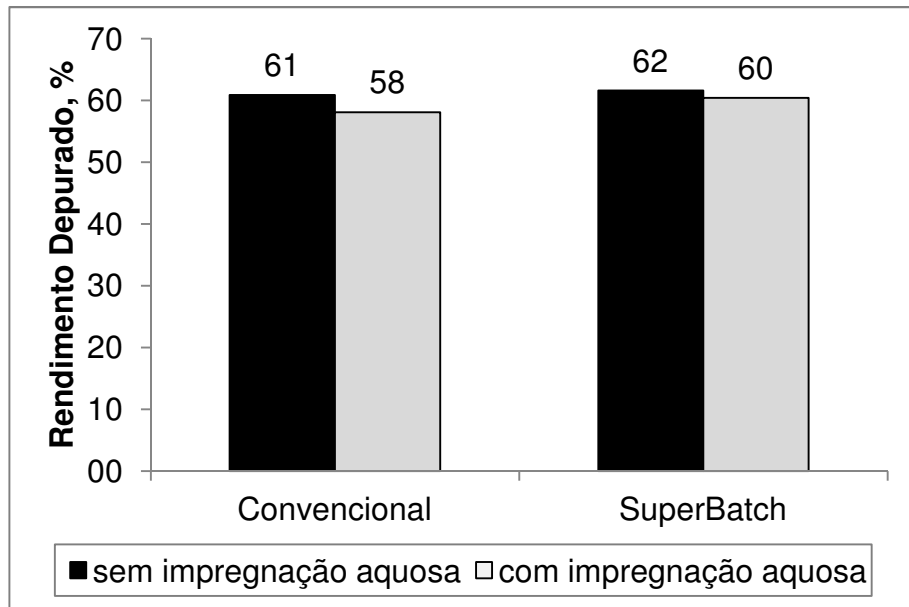


Figura 10 - Rendimento depurado dos cavacos de *Bambusa vulgaris*

O rendimento depurado do processo SuperBatch™ foi superior ao convencional. Para ambos os processos a adição da etapa de impregnação aquosa reduziu o rendimento. No entanto se considerarmos o rendimento da etapa de impregnação aquosa (98%), o rendimento depurado do processo convencional é de 59,4% e 61,7% para o processo SuperBatch™.

Vasconcelos (2005) encontrou para *Pinus taeda* os valores de 43,34% para o processo convencional e 52,31% para o processo SuperBatch™ num número kappa de 56,2 e 56,8 respectivamente.

Vera Fernández (2010) encontrou para *Bambusa vulgaris* o valor de 52,10% pra processo Soda-AQ convencional com número kappa de 50,92.

O número kappa é um parâmetro indicativo da quantidade de lignina presente na polpa, sendo uma variável pré-estabelecida pelo processo industrial, a qual exerce influência sobre o rendimento do processo e propriedades da polpa celulósica e indica a intensidade de deslignificação das polpas (ALMEIDA, 2003).

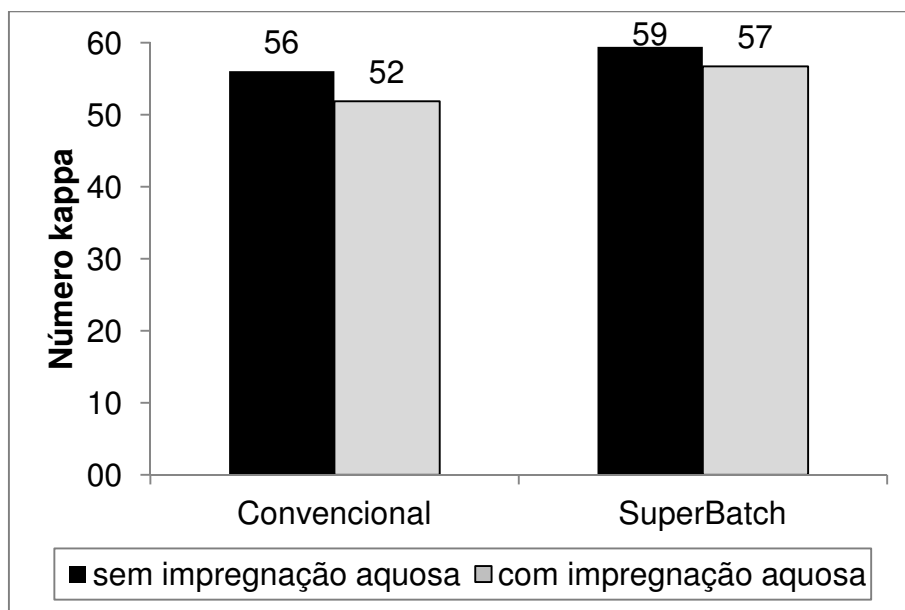


Figura 11 - Número kappa das polpas obtidas a partir de *Bambusa vulgaris*

O número kappa está inversamente relacionado ao rendimento depurado, desde que mantidas as demais condições operacionais de processo. Os resultados apresentados na figura 9 mostram que a impregnação aquosa leva a redução do número kappa. A alteração das condições de processo, tais como carga alcalina, tempos e temperaturas, visando à obtenção de polpas com mesmo número kappa (58 ± 2) levará a obtenção de maiores valores de rendimento depurado.

Os ácidos hexenurônicos são formados durante o processo de polpação kraft, a partir da conversão dos ácidos 4-O-metil-glucurônicos presentes nas xilanas. Esses compostos contribuem para o número kappa e exercem influencia sobre o processo de branqueamento, consumindo reagentes químicos (cloro, dióxido de cloro, ozônio e perácidos), ligam a íons metálicos e causam reversão de alvura de polpas branqueadas (ALMEIDA, 2003). Os resultados dos teores de ácidos hexenurônicos presentes nas polpas obtidas neste trabalho são apresentados na figura 12.

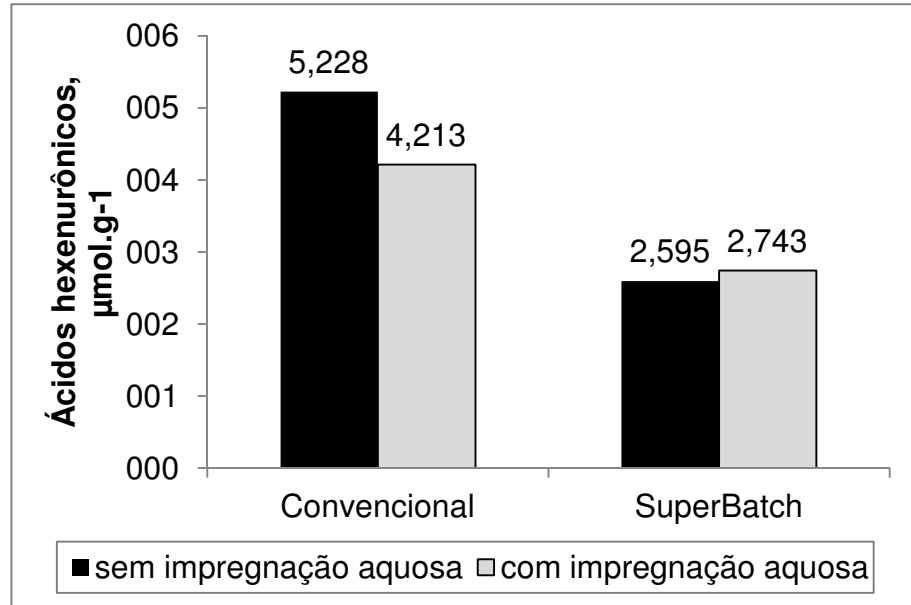


Figura 12 - Ácidos hexenurônicos das polpas obtidas a partir de *Bambusa vulgaris*

O teor de ácidos hexenurônicos nas polpas obtidas pelo processo SuperBatch™ foram menores que os das polpas obtidas pelo processo convencional de polpação. Deve-se ainda destacar que os níveis de ácidos hexenurônicos observados para as polpas obtidas neste trabalho são bastante baixo.

As polpas obtidas nesta pesquisa, em função do número kappa, não são destinadas a etapa de branqueamento; desta forma a importância do teor de ácidos hexenurônicos é reduzida.

Apesar dos números kappa semelhantes obtidos para as polpas de *Bambusa vulgaris*, estas apresentaram tonalidades diferentes, por esse motivo determinou-se a alvura das polpas.

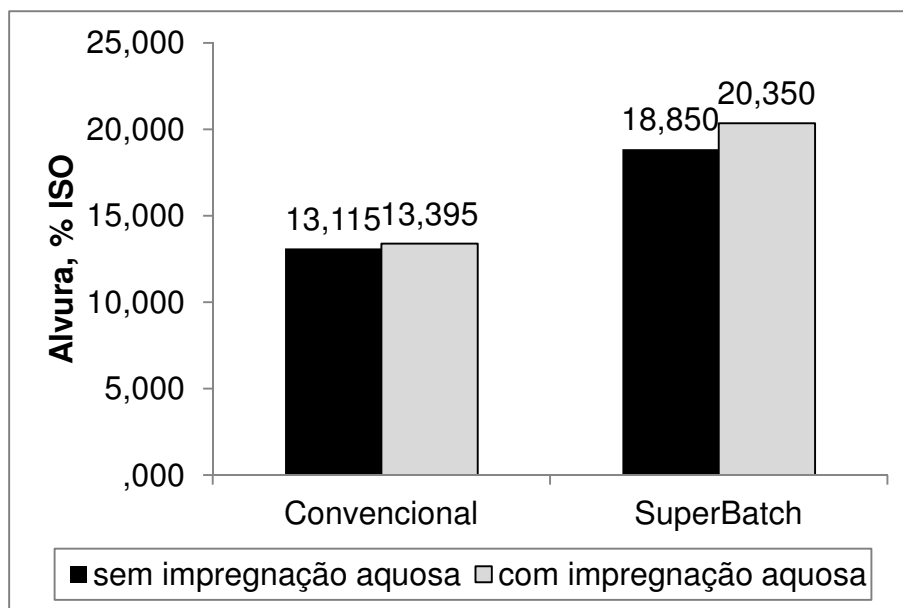


Figura 13 - Alvura das polpas de *Bambusa vulgaris*, obtidas pelos processos de polpação estudados

A alvura da polpa obtida pelo processo SuperBatch™ foi superior ao do processo convencional, sendo observado o efeito mais significativo da impregnação aquosa na alvura no processo SuperBatch™.

4.5.2 Análise de licor

Na tabela 8 e 9 estão apresentados os valores médios das análises de álcali ativo residual (AAR), sulfidez (S), teor de sólidos totais, orgânicos e inorgânicos.

Tabela 8 - Valores médios das análises de licores do processo convencional

Tratamento	Amostra	AAR, g/L	S, %	pH	sólidos totais, %	sólidos inorgânicos, %	sólidos orgânicos, %
Com impregnação aquosa	extrato	-	-	5,5	0,64	0,21	0,43
	licor final	5,1	100	10,4	13,29	4,00	9,29
Sem impregnação aquosa	licor final	5,0	100	10,4	13,70	4,10	9,60

Os resultados apresentados na Tabela 8 indicam que não houve diferença significativa entre os licores provenientes do processo convencional.

Tabela 9 – Valores médios das análises de licores do processo SuperBatch™

<i>Amostra</i>	<i>AAR, g/L</i>	<i>Sulfidez, %</i>	<i>pH</i>	<i>sólidos totais, %</i>	<i>sólidos inorgânicos, %</i>	<i>sólidos orgânicos, %</i>	
Sem impregnação aquosa	Impregnação final	2,3	86,4	10,5	7,31	3,02	4,28
	LNQ injeção	6,5	29,6	12,1	6,40	2,67	3,74
	LNQ final	2,2	58,8	10,4	7,66	2,67	4,99
	Cozimento injeção	25,0	29,7	12,4	5,64	3,98	1,66
	Cozimento final	6,3	60,1	11,7	10,61	3,23	7,38
	Lavagem 1 injeção	1,9	43,8	11,7	3,17	1,15	2,02
	Lavagem 1 final	2,4	36,3	11,7	4,46	1,52	2,95
	Lavagem 2 injeção	0,5	0,0	11,5	0,98	0,36	0,63
	Lavagem 2 final	0,9	0,0	11,6	1,71	0,52	1,18
	Com impregnação aquosa	impregnação aquosa	-	-	5,9	0,84	0,21
Impregnação injeção		4,6	34,3	12,0	6,15	2,73	3,42
Impregnação final		1,6	48,8	10,3	6,21	2,36	3,85
LNQ injeção		6,5	29,0	12,3	6,14	2,63	3,51
LNQ final		2,3	52,1	10,6	6,92	2,58	4,34
Cozimento injeção		25,6	29,8	12,6	5,32	3,83	1,49
Cozimento final		6,6	54,5	11,9	9,32	2,90	6,42
Lavagem 1 injeção		2,3	39,1	11,9	3,01	1,12	1,89
Lavagem 1 final		2,9	32,9	11,9	4,32	1,47	2,86
Lavagem 2 injeção		0,7	0,0	11,7	0,82	0,27	0,55
Lavagem 2 final	1,1	0,0	11,8	1,48	0,44	1,04	

Na figura 14 estão apresentados os valores de álcali ativo residual

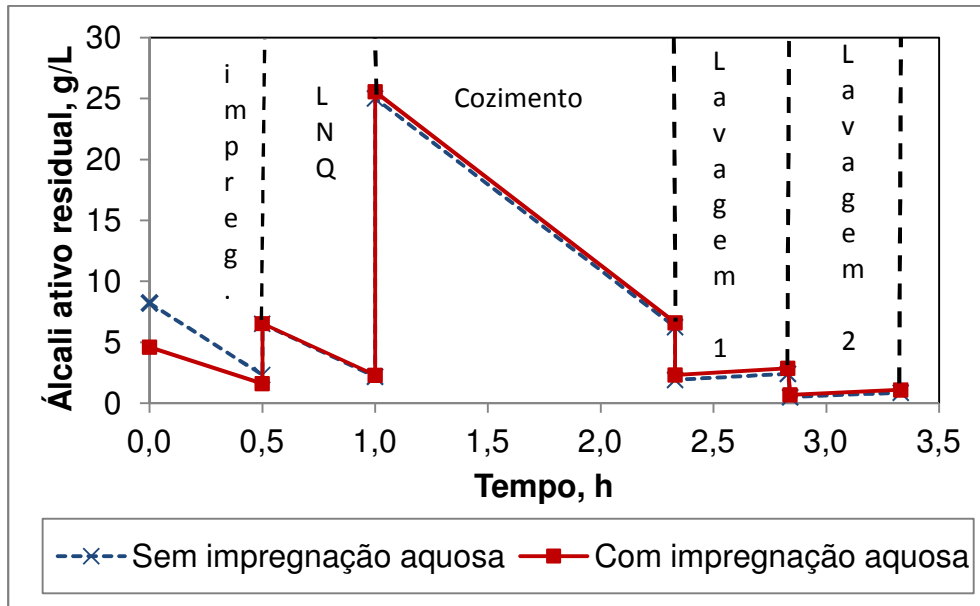


Figura 14 - Álcali ativo residual do processo SuperBatch™

Na fase de impregnação do processo SuperBatch™ é mantida uma baixa concentração de reagentes, já que apenas 20% do álcali total são aplicados nesse momento, além de conduzir o cozimento a uma baixa temperatura (90°C), para se proporcionar uma boa impregnação dos cavacos.

Na fase de licor negro quente mais 20% da carga alcalina total é aplicada e a temperatura elevada para 120°C; nessa fase grande parte da carga alcalina é consumida, visto o grande decréscimo da concentração do licor, que ao fim da fase, alcança níveis equivalentes ao fim da fase de impregnação.

Na fase de cozimento, os 60% restantes são aplicados e a temperatura elevada para 140°C, nessa fase ocorre o maior pico de concentração de reagentes, visto que a maior parte da carga alcalina é aplicada nesse momento. Apesar de um grande consumo de reagentes, ao fim dessa fase a concentração do licor ainda é alta, sendo essa característica de grande importância considerando-se o processo SuperBatch™, já que o licor ao fim da fase de cozimento é encaminhado para um vaso acumulador, visando não perder calor (energia) para ser injetado como licor negro quente em um cozimento subsequente.

Os resultados apresentados na figura 14 mostram que o perfil alcalino do processo SuperBatch™ para os cozimentos com e sem impregnação aquosa não apresentam diferenças marcantes; no entanto deve-se destacar que houve diferença no número kappa das polpas, que por sua vez indica a possibilidade de otimização

do processo de polpação que poderá levar a uma alteração no perfil alcalino do processo de polpação com impregnação aquosa.

O perfil de sólidos de processos modificados de polpação é um parâmetro que pode justificar alterações na operação destes processos. Na figura 15 estão apresentados o perfil de sólidos totais para o cozimento SuperBatch™ com e sem pré-impregnação aquosa.

O licor final do processo com impregnação aquosa apresentou um teor de sólidos orgânicos um pouco inferior ao obtido no processo sem o tratamento em questão, já que no licor da impregnação aquosa ocorreu a extração de parte do teor de sólidos.

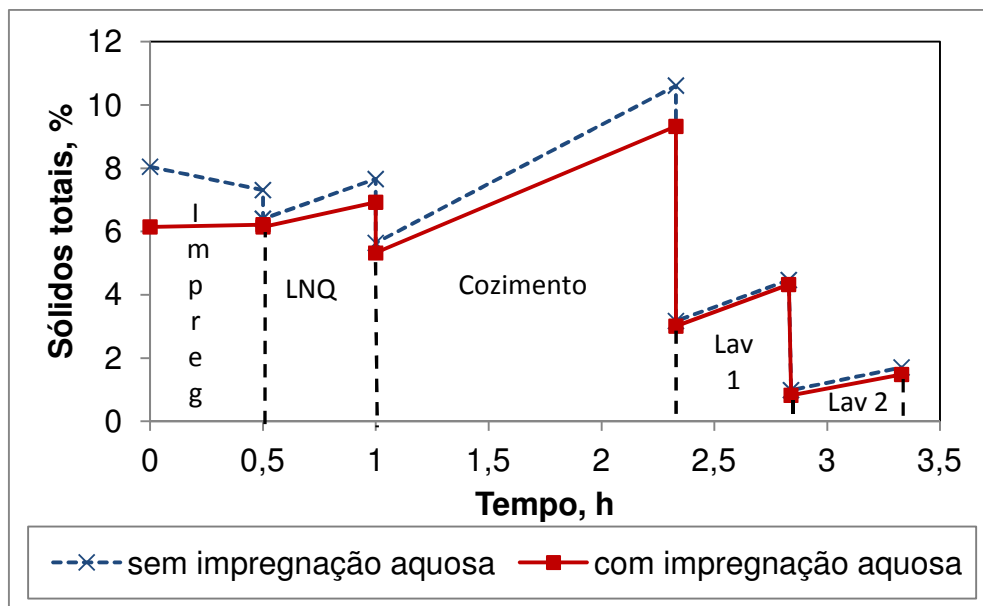


Figura 15 - Sólidos totais do processo SuperBatch™

Os perfis de sólidos apresentados na figura 13 mostram um aumento do teor de sólidos em todas as fases do cozimento, devido às reações envolvidas no processo de polpação tanto com relação à lignina como com os carboidratos. O cozimento com impregnação aquosa apresentou um teor de sólidos totais inferior nas fases iniciais do processo de polpação.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho avaliou-se o efeito de uma etapa de pré-impregnação aquosa em cavacos de *Bambusa vulgaris* sobre a eficiência de processos de polpação kraft convencional e SuperBatch™.

A caracterização tecnológica dos cavacos mostra que a densidade básica foi de 0,504 g.cm³, o teor de lignina total foi de 23,62%, de holocelulose 68,30%, de extrativos totais de 8,08% e de cinzas de 2,05%. Com relação às fibras as mesmas apresentam comprimento médio de 2,95 mm. Estes resultados estão de acordo com os encontrados para esta espécie na literatura.

Os resultados obtidos para a impregnação aquosa, associados a aspectos operacionais e de investimento mostram que os melhores resultados são obtidos com a impregnação dos cavacos por 1 hora a temperatura de 80 °C. A etapa de impregnação aquosa permite a obtenção de 1,72kg de glucose/t de cavacos.

O rendimento depurado dos processos SuperBatch™ e convencional foram respectivamente 61,6% e 60,9% para números kappa de 59,4 e 56,1.

A etapa de impregnação aquosa proporcional uma melhor deslignificação dos cavacos que se refletiu no número kappa (56,7 e 51,9). A redução o número kappa representa uma possibilidade de otimização dos parâmetros de processo com a redução do tempo e ou carga alcalina aplicada que por sua vez terão efeito benéfico no rendimento do processo.

A etapa de impregnação pode ser considerada uma alternativa interessante para processos de polpação que utilizam *Bambusa vulgaris* como matéria-prima. No entanto sugere-se um pré-tratamento com amilase para a remoção do amido e produção de biocombustíveis.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F.S. **Influência da carga alcalina no processo de polpação Lo-solids para madeiras de eucaliptos**. 2003. 115 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPELPA. **Relatório anual 2008/2009**. São Paulo, 2009. 60 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR – NM – ISO: métodos de provas**. Rio de Janeiro, 2009. 109 p.
- AZAMBUJA, I.V. **A utilização do bambu (Gramineae) na produção de celulose e papel**. 2010. 40 p. Monografia (Conclusão de Curso em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2010.
- AZZINI, A.; SALGADO, A.L.B. Bambu e suas possibilidades industriais. In: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP, 15., 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1982. p. 205-224.
- AZZINI, A.; ARRUDA, M.C.Q.; CIARAMELLO, D.; SALGADO, A.L.B.; TOMAZELLO FILHO, M. Produção conjunta de fibras celulósicas e etanol a partir do bambu. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL – SEMANA DO PAPEL, DA ABCP, 19., 1986, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1986. p. 89-100.
- _____. Produção conjunta de fibras celulósicas e etanol a partir do bambu. **Bragantia**, Campinas, v. 46, n. 1, p. 17-25, 1987.
- BARRICHELO, L.E.G.; FOELKEL, C.E.B. Produção de celulose sulfato a partir de misturas de madeira de *Eucalyptus saligna* com pequenas proporções de cavacos de *Bambusa vulgaris var. vitatta*. **IPEF**, Piracicaba, n. 10, p. 93-99, 1975.
- BASSA, A. **Processo de polpação kraft convencional e modificado com madeira de *Eucalyptus grandis* e híbrido (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus 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 produção de celulose kraft através do processo Lo-Solids®**. 2006. 103 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

BONFATTI JÚNIOR, E.A. **Características das propriedades anatômicas, química e densidade da espécie *Bambusa vulgaris* Schrad. ex J. C. Wendel., para a produção de celulose kraft com diferentes cargas de álcali.** 2010. 67 p. Monografia (Conclusão de Curso em Engenharia Florestal) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

BRITO, J.O.; TOMAZELLO FILHO, M.; SALGADO, A.L. Estudo sobre a constituição química do *Bambusa vulgaris*, visando a produção de polpa celulósica. **O Papel**, São Paulo, v. 47, n. 10, p. 64-68, out. 1986.

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 DE CELULOSE E PAPEL, 12., 1979, São Paulo. **Trabalhos técnicos...** São Paulo: ABCP, 1979. p. 75-82.

DUARTE, F.A.S. **Avaliação da medida de *Betula pendula*, *Eucalyptus globulus* e de híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* destinadas à produção de polpa celulósica kraft.** 2006. 108 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

FANTUZZI NETO, H. **Dissolução de constituintes químicos da madeira de *Eucalyptus grandis* durante a polpação kraft convencional e modificada.** 1997. 83 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

FOELKEL, C.O. Processo de impregnação dos cavacos de madeira de eucalipto pelo Licor kraft de cozimento. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, 2009. 97p. Disponível em: <<http://www.eucalyptus.com.br>>. Acesso em: 25 set. 2011.

GOMES, I.M.B. **Segmento brasileiro de polpa celulósica: evolução, competitividade e inovação.** 2011. 155 p. Tese (Doutora em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

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.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C. Influência da idade do *Bambusa vulgaris* nas suas características químicas e anatômicas visando a produção de polpa celulósica. In: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP, 14., 1981, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1981. p. 5-17.

_____. Influência do álcali ativo e da temperatura na polpação kraft de *Bambusa vulgaris*. In: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP, 15., 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1982. p. 189-203.

GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; VIVONE, R.R. Influência da pré-extração, com licor residual, na polpação kraft de bambu. In: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP, 17., 1984, São Paulo. **Trabalhos apresentados...** São Paulo: ABTCP, 1984. p. 187-210.

GULLICHSEN, J.; FOGELHOLM, J. (Ed.). **Papermaking science and technology: chemical pulping.** Helsinki: Fapet Oy, 2000. v. 6A, 693 p.

KLEINE, H.J.; FOELKEL, C. **Bambu:** matéria-prima para a fabricação de celulose e papel. Disponível em: < <http://painelflorestal.com.br/noticias/artigo/> >. Acesso em: 30 maio 2012.

KOGA, M.E.T. Matérias-primas fibrosas. In: SERVIÇO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Celulose e papel:** tecnologia de fabricação de pasta celulósica. 2. ed. São Paulo: IPT, 1988. v. 1, p. 15-40.

NOGUEIRA, C.L. **Painel de bambu laminado colado estrutural.** 2008. 92 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

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

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

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

SILVA JÚNIOR, F.G.; BRITO, J.O. Polpação. In: AREA, M.C. **Panorama de la industria de celulosa y papel em iberoamerica.** Buenos Aires: Red Iberoamericana de Docencia e Investigación en Celulosa y Papel-Riadicypp, 2008. p. 61-102.

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

SMOOK, G.A. **Handbook for pulp & paper technologists.** Vancouver: Angus Wide, 1994. 419 p.

TOMAZELLO FILHO, M.; AZZINI, A. Estrutura anatômica, dimensões das fibras e densidade básica de colmos de *Bambusa vulgaris Schrad.* **IPEF**, Piracicaba, n. 36, p. 43-50, ago. 1987.

VASCONCELOS, F.S.R. **Avaliação do processo SuperBatch™ de polpação de *Pinus taeda***. 2005. 106 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

VERA FERNÁNDEZ, M.A. **Avaliação dos processos de polpação soda-antraquinona e bissulfito-base magnésio para bambu**. 2010. 90 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Determinação do teor de extrativos totais e lignina na madeira

Extrativos Totais

1. Pesar o equivalente a 1g absolutamente seco (a. s.) de serragem e transferir para saquinho de papel filtro;
2. Colocar a amostra no corpo do extrator;
3. Fazer a extração com álcool:tolueno (1:2) e álcool 96º GL, durante 8 horas em cada solvente, deixando secar ao ar após cada extração;
4. Ligar o banho-maria e mantê-lo em ebulição;
5. Transferir toda a serragem do saquinho para erlenmeyer de 250mL;
6. Adicionar 100mL de água destilada e colocar o erlenmeyer no banho-maria (que já deverá estar fervendo) e cobri-lo;
7. Agitar suavemente a cada 15 minutos;
8. Após três horas filtrar através de cadinho de vidro sinterizado tarado, transferindo toda a serragem do erlenmeyer para o cadinho;
9. Lavar o cadinho com 250mL de água quente;
10. Levar o cadinho à estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até peso constante;
11. Pesar o cadinho seco;
12. Calcular o teor de “Extrativos Totais” através da fórmula:

$$ET(\%) = (1 - \text{massa a. s. serragem}) \times 100$$

Onde:

Massa a.s. serragem: massa de serragem seca já descontando a tara do cadinho, em gramas.

Lignina

13. Pesar 300mg da serragem livre de extrativos seca e transferir para erlenmeyer de 250mL;
14. Adicionar 3mL de H_2SO_4 72% resfriado a $10 - 12^\circ\text{C}$;
15. Manter em banho-maria a $30 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 1 hora, misturando frequentemente com auxílio de bastonete;

16. Retirar do banho-maria e adicionar 84mL de água destilada quente, transformando o H₂SO₄ 72% em H₂SO₄ 3%;
17. Colocar o erlenmeyer em autoclave, devidamente vedado com papel alumínio, a 118°C (27psi) durante 60 minutos;
18. Filtrar através de cadinho sinterizado tarado, fazendo um fundo com papel de filtro, e transferir toda a lignina do erlenmeyer para o cadinho;
19. Lavar com 700mL de água quente;
20. Levar o cadinho à estufa a 103 ± 2°C até peso constante;
21. Pesar o cadinho seco;
22. Calcular o teor de lignina residual (L.R.) através da fórmula:

$$LR(\%) = \left(\frac{\text{massa a. s. final}}{\frac{0,3}{1 - \frac{ET}{100}}} \right) \times 100$$

Onde:

Massa a.s. final: massa de lignina seca já descontando a tara do cadinho, em g.

23. Transferir o filtrado obtido nos itens 18 e 19 para balão volumétrico de 1000 mL, completando o volume com água destilada;
24. Preparar prova em branco, diluindo 3mL de ácido sulfúrico 72% para 1000 mL;
25. Utilizando cubeta de quartzo e a prova em branco, ajustar o espectrofotômetro em 0 de absorvância no comprimento de onda 215nm e 280nm;
26. Prosseguir com a leitura dos filtrados
27. Calcular os teores de lignina solúvel (L.S.) e lignina total (L.T.) através das fórmulas:

$$LS(\%) = \left[\frac{4,53 \times (L_{215} - L_{280})}{300 \times \left(\frac{0,3}{1 - \frac{ET}{100}} \right)} \right] \times 100$$

Holocelulose

$$\text{Holocelulose}(\%) = 100 - (ET + LR + LS)$$

APÊNDICE B - Determinação do álcali ativo em licores brancos e licores negros

1. Adicionar, em um erlenmeyer, 50 mL de água destilada, 5 mL do licor (licor branco ou licor negro) e 25 mL de Cloreto de Bário 10%;
2. Titular com ácido clorídrico 0,5 N até pH 9,34 (Vol.A);
3. Adicionar 5 mL de formaldeído 37%;
4. Titular com ácido clorídrico 0,5 N até pH 9,34 (Vol.B);
5. Calcular as concentrações de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S) através das fórmulas:

$$\text{NaOH(g/L)} = (2 \times \text{Vol. A} - \text{Vol. B}) \times 8 \times \text{NHCl}$$

$$\text{Na}_2\text{S(g/L)} = (2 \times \text{Vol. B} - \text{Vol. A}) \times 8 \times \text{NHCl}$$

Onde:

N HCL: Normalidade do ácido clorídrico.

6. Calcular álcali ativo, álcali efetivo e sulfidez através das fórmulas:

$$\text{Álcali Ativo (g/L)} = \text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$$

$$\text{Álcali Efetivo (g/L)} = \text{NaOH} + \frac{1}{2} \text{Na}_2\text{S}$$

$$\text{Sulfidez(\%)} = \frac{\text{Na}_2\text{S}}{\text{Álcali Ativo}}$$