

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE**  
**CAMPUS CASCAVEL**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**FARELO DE TRIGO COMO MATÉRIA-PRIMA PARA PRODUÇÃO DE PAPEL**

**KARINE DASSOLER**

**CASCAVEL**

**2017**

**KARINE DASSOLER**

**FARELO DE TRIGO COMO PRINCIPAL MATÉRIA-PRIMA PARA PRODUÇÃO DE PAPEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola como cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração: recursos hídricos e saneamento ambiental.

Orientador: Dr. Benedito Martins Gomes

**CASCADEL – PARANÁ – BRASIL**

**JULHO, 2017.**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

D256f

Dassoler, Karine

Farelo de trigo como principal matéria-prima para produção de papel. /  
Karine Dassoler. Cascavel, 2017.  
40 f.

Orientador: Prof. Dr. Benedito Martins Gomes

Revisor: Prof. Dr. José Carlos Costa

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná,  
Campus de Cascavel, 2017

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

1. Saneamento ambiental. 2. Papel. 3. Celulose. I. Gomes, Benedito  
Martins. II. Costa, José Carlos, Rev. III. Universidade Estadual do Oeste do  
Paraná. IV. Título.

CDD 20.ed. 628

CIP-NBR 12899

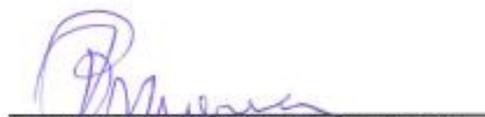
Ficha catalográfica elaborada por Helena Soterio Bejio – CRB 9ª/965

Revisão de língua inglesa e portuguesa e das normas de edição conforme requisitos do PGEAGRI:  
Prof. Dr. José Carlos Costa, em 10 de outubro de 2017.

## KARINE DASSOLER

Farelo de Trigo como Matéria-Prima para Produção de Papel

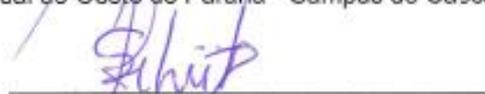
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestra em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, linha de pesquisa Saneamento Ambiental, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



---

Orientador(a) - Benedito Martins Gomes

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



---

Fabiana Costa de Araujo Schutz

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



---

Simone Damasceno Gomes

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Cascavel, 12 de julho de 2017

## BIOGRAFIA

Karine Dassoler nasceu na cidade de Cascavel – PR, em 28 de outubro de 1990. Em 2010 iniciou o curso de graduação em Tecnologia em Processos Químicos, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, *Campus* de Toledo, concluído em 2013. Atuou no setor industrial e laboratorial, tendo experiência nas áreas de análise de água, efluentes e alimentos e controle de qualidade. Em 2015, iniciou o curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, na área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Câmpus de Cascavel, como discente bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.

## AGRADECIMENTOS

À Faculdade da Indústria Senai unidade de Telêmaco Borba – PR, que forneceu completo apoio à minha pesquisa e sem a qual este trabalho não teria sido possível.

À CAPES, pelo apoio financeiro que possibilitou a realização deste trabalho.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, pela oportunidade.

Aos docentes da Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UNIOESTE, pela paciência e dedicação.

Ao meu orientador Dr. Benedito Martins Gomes, pela orientação, paciência e por dividir seus conhecimentos.

Às amigas que o mestrado me trouxe: Bruna, Camila, Ketllin e Regiane, pela agradável convivência.

Aos membros da banca avaliadora: Professora Dra. Simone Damasceno Gomes e Professora Dra. Fabiana Costa de Araujo Schütz, por suas contribuições a este trabalho.

A todos que de alguma forma contribuíram com esta pesquisa, meus sinceros agradecimentos!

# FARELO DE TRIGO COMO MATÉRIA PRIMA PARA A PRODUÇÃO DE PAPEL

## RESUMO

O papel é um material extremamente versátil que, por possuir propriedades químicas e físico-mecânicas únicas, pode ter diversas aplicações: escrita e impressão, produção de jornais, papéis sanitários, embalagens, entre outras. A madeira é a principal matéria-prima utilizada na indústria papelreira e apenas 40 a 50% de sua massa total inicial é aproveitada na produção de papel. A fibra madeireira mais amplamente explorada no setor é o eucalipto, sendo que o Brasil abriga a maior área superficial plantada com essa árvore. Diversos são os impactos ambientais que essa monocultura causa, como a extrema dependência de agroquímicos e o elevado consumo de água, característico da espécie, os quais são agravados pelo fato de o eucalipto não ser uma árvore nativa brasileira. É de vital importância o desenvolvimento de tecnologias que busquem soluções sustentáveis e diminuam esses impactos. Diversos trabalhos vêm sendo realizados com o uso de matérias-primas alternativas para a fabricação de papel e os resultados mostram que é possível substituir a madeira sem grandes alterações no processo e equipamentos já utilizados. O trigo tem significativo peso na economia agrícola global, pois é o segundo cereal mais produzido no mundo. A parte do grão que não é destinada à moagem para produção de farinha é conhecida como casca ou farelo de trigo: um subproduto das indústrias moageiras, rico em celulose e hemicelulose. O objetivo deste trabalho foi utilizar o farelo de trigo como matéria-prima para produção de papel por meio do processo soda. Três ensaios foram realizados, o primeiro em função do Fator H de 800 e uma concentração de álcali de 14%, o segundo e o terceiro em função do tempo de 15 minutos com concentrações de álcali de 12% e 16%, respectivamente. A melhor condição operacional foi com uma concentração de álcali de 12% e tempo de cozimento de 15 minutos. Nesta condição, o rendimento da polpa foi de 35,08% e foi possível a produção de papel numa proporção de até 50% de polpa de farelo de trigo combinada com polpa de eucalipto. Foi possível a manutenção das propriedades físico-mecânicas no papel produzido, sendo este uma alternativa que causa menor impacto ambiental durante o processo produtivo e aproveita um resíduo agroindustrial.

**Palavras-chave:** soda; papel; celulose.

## WHEAT BRAN AS RAW MATERIAL FOR PAPER PRODUCTION

### ABSTRACT

Paper is an extremely versatile material that, by possessing chemical, physical and mechanical unique properties, can have several applications such as writing and printing, newspaper production, sanitary papers, packaging, among others. Wood is the main raw material used in the paper industry and only 40 and 50% of its total initial mass is applied in paper production. The most explored wood fiber in this sector is eucalyptus and Brazil has the largest surface area planted with trees. This monoculture has caused several environmental impacts, such as extreme dependence on agrochemicals and high consumption of water, typical of the species, which are worsened since eucalyptus is not a native Brazilian tree. It is extremely important the development of technologies that search for sustainable solutions and reduce these environmental impacts. Several studies have been carried out using alternative raw materials for paper manufacture. The results have shown that is possible to replace wood without major changes in the process and equipment already used. Wheat has significant importance in the global agricultural economy, since it is the second most-produced cereal. The wheat husk or bran is the grain part that is not used for milling flour production. It is a byproduct of the milling industries rich in cellulose and hemicellulose. Thus, this study aimed at using wheat bran as raw material for paper production by soda process. Three tests were performed, the first using a H-Factor of 800 and an alkali concentration of 14%, the second and the third using 15 minutes of time with alkali concentrations of 12% and 16%, respectively. The best operating condition was with an alkali concentration of 12% and cooking time of 15 minutes. In this condition, pulp yield was 35.08% and it was possible to produce paper in a proportion of up to 50% ratio of wheat bran pulp combined with eucalyptus pulp. It was possible to maintain the physical-mechanical properties in the paper produced, which is an alternative that causes less environmental impact during the production process and avail an agroindustrial residue.

**Key-words:** soda; paper; cellulose.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos .....	3
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
3.1 Histórico da fabricação do papel.....	4
3.2 Indústria de papel e celulose .....	5
3.2.1 Testes de qualidade do papel.....	9
3.2.2 Setor de papel e celulose no Brasil .....	10
3.3 Fibras vegetais .....	11
3.3.1 Farelo de trigo .....	13
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>16</b>
4.1 Material.....	16
4.2 Métodos.....	16
4.2.1 Caracterização do material.....	16
4.2.2 Cozimento da polpa.....	16
4.2.3 Formação de folha.....	18
4.2.4 Testes de qualidade .....	18
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>20</b>
5.1 Caracterização do material .....	20
5.2 Cozimento da polpa.....	20
5.3 Formação de folha.....	22
5.4 Testes de qualidade .....	23
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>25</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>26</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>27</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	Resultados da análise físico-química do licor do segundo cozimento.....	21
<b>Tabela 2</b>	Resultados obtidos nos testes de qualidade.....	23
<b>Tabela 3</b>	ANOVA – Resistência a tração.....	24
<b>Tabela 4</b>	ANOVA – Resistência ao arrebatamento.....	24

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Preparação da matéria-prima e polpação. ....	7
<b>Figura 2</b>	Lavagem, branqueamento e adição de aditivos na pasta celulósica. ....	8
<b>Figura 3</b>	Formação de folha e secagem do produto final. ....	9
<b>Figura 4</b>	Fluxograma simplificado do processo de obtenção da farinha de trigo. ....	14
<b>Figura 5</b>	Principais divisões morfológicas do grão de trigo. ....	15
<b>Figura 6</b>	Reator autoclave rotatório REGMED. ....	17
<b>Figura 7</b>	Formador de folhas REGMED. ....	18
<b>Figura 8</b>	Papel produzido com o farelo de trigo e polpa de eucalipto combinados. ....	22

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional contribui para o aumento da atividade industrial, principalmente na produção de produtos de primeira necessidade. A atividade industrial é uma das principais responsáveis pela contaminação ambiental, assunto preocupante não somente para cientistas e ativistas, mas para a população em geral que já testemunha a deterioração do planeta. Ainda que exista uma preocupação real para evitar a contaminação ambiental, muitos processos produtivos são intrinsecamente poluentes. Por isso, têm sido realizados diversos estudos objetivando diminuir o volume e a toxicidade dos efluentes gerados. Há uma forte procura nas indústrias de papel e celulose por tecnologias limpas, que poderiam permitir atingir o estado de descarga zero, isto é, minimizar a geração e realizar a completa reutilização dos efluentes gerados (DÚRAN et al., 1997).

O papel ainda é um dos materiais mais importantes e versáteis que existe, por possuir propriedades químicas e físico-mecânicas únicas, o que possibilita diversas aplicações: escrita e impressão, produção de jornais, papéis sanitários (guardanapos e papéis higiênicos), embalagens, entre outras (BRASILEIRO et al., 2001).

Formado por fibras celulósicas, o papel tem como principal matéria-prima a madeira. A sua produção é feita em várias etapas que vão desde o corte da madeira, o descascamento e a lavagem até os processos químicos como polpação e branqueamento. Apenas 40 a 50% da massa total inicial da madeira é aproveitada para a produção de papel. Além dos resíduos da própria madeira, o processo gera resíduos químicos nas suas duas etapas principais: a polpação que gera o lodo escuro e o branqueamento que gera principalmente fenóis clorados (DÚRAN et al., 1997).

Muitos trabalhos vêm sendo realizados, utilizando matérias-primas alternativas para a fabricação de papel, mostrando ser possível substituir a madeira sem grandes alterações no processo e equipamentos já utilizados (NEVES; ROJA, 2002; CORAIOLA; MARIOTTO, 2009; LÓPEZ et al., 2011).

O trigo é o segundo cereal mais produzido no mundo e tem significativo peso na economia agrícola global. No Brasil, o trigo é cultivado nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste (BRASIL, 2012). A parte do grão que não é destinada à moagem para produção de farinha é chamada de casca de trigo, também conhecida como farelo, sendo um subproduto das indústrias moageiras de trigo. Esse material é utilizado por algumas indústrias como adubo, ração animal e fonte de energia para combustão. Pequenos produtores utilizam a casca na produção de artesanatos e, em alguns países da Europa,

esse resíduo também é utilizado na produção de papel, por ser rico em celulose e hemicelulose (CANILHA, 2006).

O farelo de trigo, quando utilizado como matéria-prima para a produção de papel, elimina a primeira parte do processo (corte, descascamento e lavagem), visto que o farelo de trigo já vem limpo e moído das indústrias de beneficiamento. O impacto ambiental causado pelo reflorestamento e derrubamento das árvores também é reduzido. Considerando-se essas condições de uso desse resíduo, julga-se a relevância desta pesquisa em estudar um novo método de produção de papel e sua aplicabilidade na indústria de papel, em que o farelo de trigo é a matéria-prima e utiliza-se o processo soda, que consiste em utilizar hidróxido de sódio para obtenção da polpa celulósica.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar a viabilidade da utilização de farelo de trigo como matéria-prima para a produção de papel utilizando o processo soda.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Examinar a praticabilidade da obtenção de polpa de farelo de trigo através do processo soda, em escala piloto;
- Testar a possibilidade de fabricação de papel a partir da polpa de farelo de trigo combinada com polpa de eucalipto;
- Verificar a qualidade do papel produzido por meio de testes de: gramatura, espessura, densidade aparente, resistência à tração e ao arrebatamento.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Histórico da fabricação do papel

O homem sempre sentiu necessidade de registrar as atividades que fazem parte do seu dia a dia e as primeiras tentativas desse registro se deram na forma de desenhos simples em pedras e nas paredes das cavernas. Essas representações foram ficando mais complexas e permitiam a comunicação, a transmissão de ideias e a reprodução dos hábitos e culturas da época. A evolução da inteligência humana fez com que o homem passasse a utilizar outras formas de suporte para seus registros, que permitissem trabalhos mais refinados e pudessem ser conservados e transportados. Uma das primeiras estruturas diferente das paredes das cavernas foi o uso de tabletes de barro cozido na região que compreendia a Babilônia (CHERTMAN, 2007).

Posteriormente, utilizaram-se também de cascas de árvores, folhas e marfim. O papiro, que deu origem a palavra papel, foi fabricado por volta de 2500 a.C., a partir de uma gramínea que cresce nas margens do rio Nilo. Existiram, ainda, outros materiais primitivos que eram utilizados para escrever, como a pele de animais na forma de pergaminhos e as tábuas recobertas de cera dos romanos. Somente por volta de 105 a.C. a fabricação de papel a partir da polpação de fibras vegetais, semelhante ao processo utilizado nos dias de hoje, foi inventada pelos chineses (FRACARO, 2012).

As primeiras aplicações do papel foram os mantras dos monges budistas e o envio de mensagens pelos militares que, com isso, obtinham vantagens estratégicas nas guerras (CHERTMAN, 2007). O processo só se tornou conhecido no sul da Europa no final do século XIV e depois, em 1690, foi construída a primeira fábrica de papel nos Estados Unidos. Com a Bíblia de Gutenberg se deu início à impressão de livros em massa no Ocidente e, a partir daí, eclodiu a crescente demanda pelo papel baseado em trapos (SHREVE; BRINK JÚNIOR, 1977).

Com o passar do tempo, novos equipamentos foram desenvolvidos para facilitar o processo de fabricação do papel. A batedeira holandesa foi inventada em 1750 e, desde então, adotada. Em 1799, um processo de formação da folha de papel sobre uma tela metálica móvel foi criado pelo francês Nicolas L. Robert. Essa máquina é conhecida hoje como a máquina *Fourdrinier*. A máquina a cilindro foi inventada em 1809 por John Dickinson, levando a *Fourdrinier* à inatividade até cerca de 1830, quando teve sua importância reconhecida. Os cilindros a vapor se mostraram úteis para a secagem do papel e foram utilizados pela primeira vez em 1826. A expansão da produção possibilitada pelo

uso conjunto de ambas as máquinas aumentou, significativamente, a demanda de trapos, o que levou a um regime de escassez da matéria-prima (SHREVE; BRINK JÚNIOR, 1977).

Em 1844, na tentativa de utilização de outros materiais para fabricação de papel, Friedrich G. Keller inventou um processo mecânico para produção de polpa a partir da madeira. Charles Watt e Hugh Burgess desenvolveram o processo à base de soda em 1851. Em 1867, a patente fundamental do processo sulfito foi concedida ao químico americano Benjamin Tilghman. O processo ao sulfato, também conhecido como processo *kraft*, que significa forte na língua alemã, foi o resultado de diversos experimentos realizados por Carl J. Dahl, em 1884. Esse processo só foi introduzido nos Estados Unidos em 1909. Talvez, a elevação do processo *kraft* a um patamar de importância máxima na indústria, tenha sido a maior modificação industrial dos últimos anos (SHREVE; BRINK JÚNIOR, 1977).

O controle e a manipulação dos subprodutos da indústria de papel e celulose receberam vasta atenção. A utilização da lignina e dos licores de despejo para obtenção de subprodutos úteis instituiu um aumento de renda para a indústria e, ainda, uma solução parcial para os resíduos gerados (SHREVE; BRINK JÚNIOR, 1977). A polpação de fibras vegetais é o método mais popular e propagado na fabricação de papel até os dias atuais, sendo que a principal diferença entre os tipos de papéis existentes está nas tecnologias e aditivos aplicados na confecção (CHERTMAN, 2007).

### **3.2 Indústria de papel e celulose**

O propósito das indústrias de papel e celulose é a transformação de materiais fibrosos em celulose, que é, em seguida, utilizada na fabricação de diversos tipos de papel. Múltiplos processos estão envolvidos na produção de papel: preparação da matéria-prima, polpação, branqueamento, formação de folha, recuperação química e secagem do produto final (WORRELL et al., 2008).

A principal matéria-prima utilizada é a madeira, que possui uma grande quantidade de água, resinas e extrativos, por isso deve ficar exposta ao ambiente após o corte para que fique mais seca e perca as substâncias que podem influenciar no processo produtivo. O primeiro passo para a extração da celulose consiste no descascamento da madeira que ocorre dentro de tambores rotatórios. O movimento rotacional destes tambores favorece o contato entre as toras e a parede do cilindro, gerando um atrito que é responsável pelo descascamento da madeira. Em seguida, as toras descascadas são picadas e reduzidas a fragmentos, chamados de cavacos, para que a área superficial que entrará em contato com os licores na etapa seguinte seja aumentada. No final do processo de preparação da

matéria-prima, os cavacos são classificados em peneiras de seleção e os que possuem dimensões inferiores ao padrão requerido são dirigidos às caldeiras de biomassa, ao passo que os que apresentam dimensões superiores retornam ao picador. A uniformidade no tamanho dos cavacos é de suma importância para que o cozimento seja feito de forma homogênea (CHERTMAN, 2007).

O processo de obtenção da polpa, genericamente definido como polpação, envolve a separação das fibras da matéria vegetal através de um processo industrial mecânico, químico ou a combinação entre eles, dependendo do papel a ser produzido. No processo mecânico, as fibras são separadas por um desfibrador de pedra ou por discos rotativos de metal. Nesse processo há uma conversão de até 95% da madeira em celulose, por esse motivo, a celulose mecânica também é conhecida como pasta de alto rendimento (FRACARO, 2012). A separação completa das fibras dos demais constituintes vegetais não é possível com o processo mecânico, fazendo-se com que a sua aplicação seja limitada, uma vez que o papel produzido a partir dela tende a se deteriorar mais rapidamente, devido à oxidação da lignina residual. A pasta obtida é considerada de menor qualidade, sendo utilizada em papéis menos nobres, como o papel imprensa (NAVARRO; NAVARRO; TAMBOURGI, 2007).

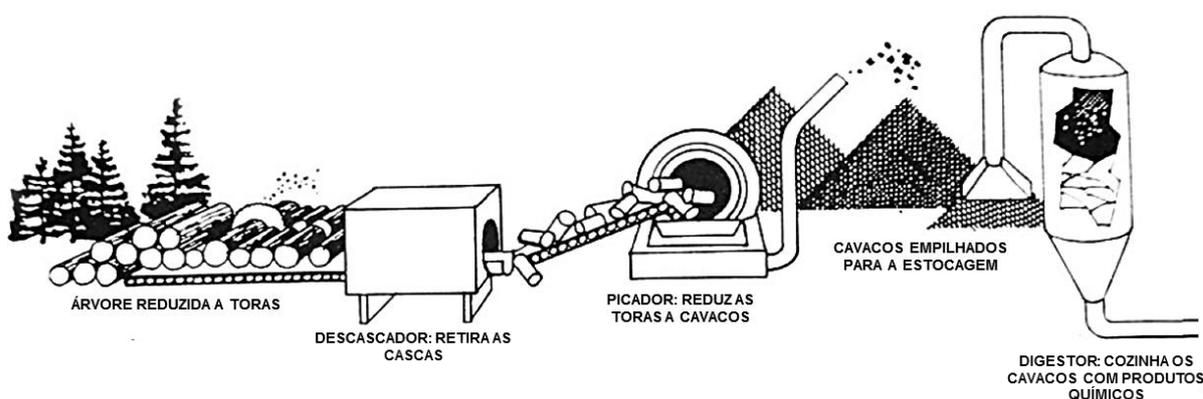
Outro tipo de processo industrial para obtenção de celulose é a pasta semiquímica. Nessa técnica, os cavacos de madeira são submetidos a um tratamento químico intenso, contudo menos agressivo que na fabricação de celulose química. Ainda que esse processo tenha maior rendimento e menor consumo de produtos químicos do que a produção de celulose química, o alto teor de lignina e a cor enegrecida da pasta impossibilita sua aplicação na produção de papéis mais nobres (FRACARO, 2012).

Tem-se, ainda, a celulose química, processo no qual a madeira é cozida com produtos químicos visando à separação entre as fibras e a lignina que estruturam a madeira. Há muitas variações no processo de obtenção da celulose química, a primeira técnica utilizada foi o processo soda, definido pelo uso do hidróxido de sódio (NaOH) ou carbonato de sódio (CO<sub>3</sub>Na) no processo de cozimento. Posteriormente, esse método foi substituído pelo processo sulfito, que utilizava sulfito de cálcio (CaSO<sub>3</sub>) na polpação e era considerado um processo mais simples que produzia uma celulose mais brilhosa. Em meados de 1900, o processo sulfato, também denominado de processo *kraft* (do alemão: forte), foi inventado e predomina no mercado até os dias atuais. Esse método consiste no uso combinado de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na<sub>2</sub>S) durante a polpação (FRACARO, 2012).

O processo kraft tem se estabelecido como o processo de polpação química mais versátil e econômico, uma vez que preserva a resistência das fibras e dissolve bem a lignina, formando uma pasta forte que pode ser branqueada (VAN HEININGEN, 2006). Esse método é caracterizado pela possibilidade da utilização das mais variadas matérias-primas

como coníferas, folhosas, resíduos agrícolas etc., e também pelas excelentes características das fibras em termos de resistência (CIT, 2013).

As principais vantagens do processo kraft são a possibilidade de recuperação dos produtos químicos utilizados e a ausência de restrições quanto ao uso da celulose obtida. Em contrapartida, algumas desvantagens merecem destaque: alto custo de implantação; baixa alvura após cozimento, quando comparado a outros processos como, por exemplo, o sulfito; odor dos gases resultantes do processo; baixo rendimento (apenas 40 a 50%) e alto custo de branqueamento (TUTUS; ATES; DENIZ, 2010). Um esquema resumido da preparação da matéria-prima e posterior polpação pode ser observado na Figura 1.



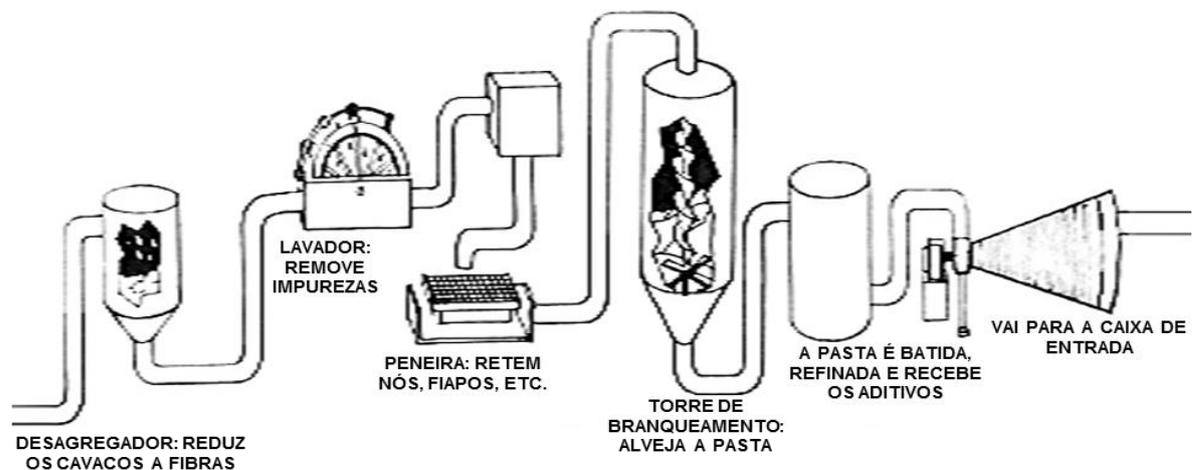
**Figura 1** Preparação da matéria-prima e polpação.

O fator H é um parâmetro muito utilizado na fabricação de papel e celulose, uma vez que agrega as variáveis de temperatura e tempo em uma só. Utilizando condições de cozimento constantes e um mesmo fator H, mas com diferentes combinações de tempo e temperatura, obtêm-se polpas com qualidades semelhantes.

O produto obtido com a polpação é a celulose escura, uma vez que a lignina remanescente adquire esta coloração quando exposta a altas temperaturas. O resíduo do cozimento é chamado de licor negro que, por possuir grande quantidade de substâncias prejudiciais ao meio ambiente e material orgânico, deve ser submetido a tratamento que, além de recuperar os produtos químicos utilizados no cozimento, permite a utilização do seu potencial energético (CHERTMAN, 2007).

O objetivo do branqueamento é melhorar as propriedades da pasta celulósica por meio de tratamento físico-químico. Na celulose química, a lignina é removida em sua maior parte no processo de polpação, contudo algumas impurezas devem ser removidas em um processo de lavagem denominado pré-branqueamento. Em seguida, são aplicados reagentes como o cloro, que oxida a lignina residual e agentes branqueadores como o peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) que atuam diretamente sobre as substâncias coloridas (cromóforos), modificando-as quimicamente (CASTRO, 2009).

Após o branqueamento da polpa celulósica, dá-se início à fabricação do papel propriamente dita que consiste em três etapas principais: preparação da massa, formação da folha e secagem. Na preparação da massa, a polpa celulósica já branqueada, recebe diferentes aditivos que podem ser corantes, cargas minerais, alvejantes, agentes de colagem, dispersantes entre outros. As dosagens desses aditivos são determinadas em função do tipo de papel a ser produzido. Ainda nesta fase, a polpa passa por um tratamento mecânico de fibrilação interna e externa da celulose, fazendo com que as fibras apresentem pequenas ramificações, o que aumenta o contato e as pontes de hidrogênio entre elas (FRACARO, 2012). A Figura 2 traz uma representação das etapas de lavagem, branqueamento e adição de aditivos.

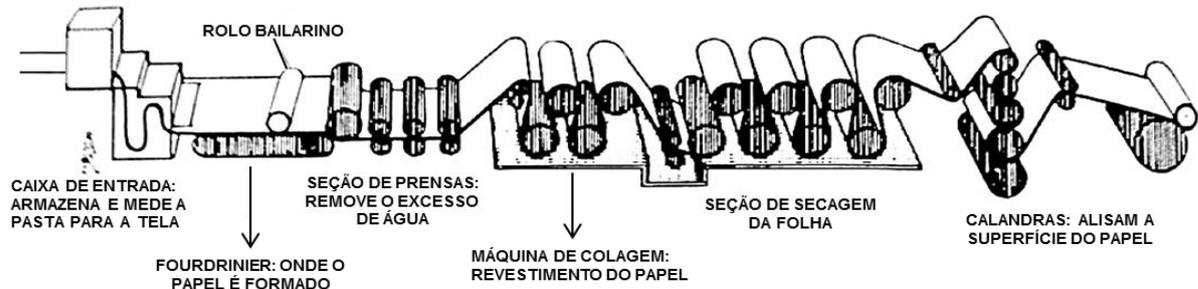


**Figura 2** Lavagem, branqueamento e adição de aditivos na pasta celulósica.

Após essa etapa, a massa é depositada em uma tela formadora na qual ocorre a drenagem da água por gravidade ou por caixas de vácuo. Ao término dessa etapa, em que a concentração de sólidos é de aproximadamente 23%, a tela passa por uma região de prensas para reduzir o percentual de água na pasta. O teor de sólidos nessa etapa varia de acordo com a gramatura do papel a ser produzido, a velocidade da máquina e outros fatores, podendo chegar a 60% (CHERTMAN, 2007).

Devido à característica higroscópica das fibras, somente a gravidade, o vácuo e as prensas não são suficientes para a remoção de toda a água necessária, sendo imprescindível o fornecimento de energia na forma de calor. Em grandes indústrias papelarias, o papel circula entre cilindros aquecidos enquanto um fluxo de vapor de água saturado atravessa o interior desses cilindros, fazendo com que a água remanescente evapore até o papel atingir um teor de umidade entre 2 e 6% (CHERTMAN, 2007; FRACARO, 2012).

O papel destinado à escrita recebe a adição de breu durante a preparação da massa, além de um banho superficial de amido de mandioca durante a etapa de secagem de modo que se torne mais absorvente, a fim de que se possa escrever em sua superfície com tinta ou um pouco mais áspera para o uso de lápis (SÉKULA, 2011). Um resumo das etapas de formação de folha e secagem do produto final pode ser observado na Figura 3.



**Figura 3** Formação de folha e secagem do produto final.

Para que uma indústria de celulose química seja economicamente viável, a recuperação química se faz necessária. O licor negro, rejeito da etapa de polpação, é rico em materiais orgânicos como polissacarídeos, compostos resinosos, lignina e uma grande quantidade de sais. Essas substâncias concedem a esse resíduo um excelente potencial energético que, se for desperdiçado, inviabiliza o processo produtivo economicamente e coloca em risco o meio-ambiente (CHERTMAN, 2007). Na recuperação química, o licor negro é concentrado através de evaporação e, posteriormente, queimado para geração de vapor de alta pressão em uma caldeira de recuperação, que pode ser utilizado na produção de eletricidade em uma unidade de cogeração e/ou para realizar as reações de redução para a recuperação de químicos. Usualmente, a eficiência de uma caldeira de recuperação é de, aproximadamente, 60% (FRACARO, 2012).

### 3.2.1 Testes de qualidade do papel

Os testes de qualidade determinam as propriedades do papel, as quais são extremamente dependentes da umidade. Assim, essas análises devem ser realizadas em ambiente controlado e padronizado. Em função da característica a ser analisada, os ensaios podem ser de propriedades superficiais (lisura), permeabilidade a fluidos (resistência à passagem do ar), de natureza ótica (opacidade, cor, brilho, alvura), de natureza elétrica (rigidez dielétrica, condutividade), de natureza química (pH, umidade) e de natureza

mecânica (absorção de energia de tensão (TEA), gramatura, resistência ao rasgo, ao arrebatamento, à rigidez e à tração) (SAMISTRARO et al., 2009).

- Gramatura: a gramatura do papel afeta a maioria de suas propriedades, principalmente as mecânicas e as óticas. Essa medida nada mais é do que a massa do papel expressa em gramas por metro quadrado ( $\text{g m}^{-2}$ ). A gramatura é comumente especificada na compra e venda do papel (CIT, 2013).
- Espessura: uma das características mais relevantes para definir a aplicação do papel é a sua espessura. Pode ser definida como a distância em milímetros entre as duas superfícies predominantes do papel, medida sob pressão constante ( $50 \pm 2 \text{ kPa}$ ) em micrômetro padronizado que possui dois discos planos paralelos, entre os quais se coloca o corpo de prova (CIT, 2013).
- Densidade aparente: a densidade aparente é assim denominada por incluir os espaços preenchidos com ar. É a relação entre a gramatura em gramas por metro quadrado ( $\text{g m}^{-2}$ ) e a espessura em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ), o resultado é expresso em gramas por centímetros cúbicos ( $\text{g cm}^{-3}$ ) (CIT, 2013).
- Resistência à tração: os papéis devem resistir aos diferentes tipos de forças a que são submetidos ao longo do processo de produção e utilização. Desse modo, a resistência à tração é relacionada com a utilidade e durabilidade do papel. Essa medida é determinada submetendo-se um corpo de prova de medidas especificadas a um esforço de tração uniformemente crescente até a sua ruptura. Os corpos de prova devem ser testados nas direções longitudinal e transversal, uma vez que as características diferem pela direção na folha. Nos papéis de impressão, a resistência à tração indica a probabilidade de ruptura quando são sujeitos à tensão exercida no processo de impressão (CIT, 2013).
- Resistência ao arrebatamento: é a pressão máxima uniforme suportada por um corpo de prova de papel numa área de 30,5 mm de diâmetro (CIT, 2013).

### **3.2.2 Setor de papel e celulose no Brasil**

Na produção de celulose, a matéria-prima predominantemente utilizada é proveniente de fibras de madeira. As florestas artificiais de pinus e eucalipto são as duas principais fontes de madeira utilizadas no Brasil, totalizando mais de 98% do volume produzido. No entanto, outras espécies vegetais como juta, algodão, bambu, milho, cana de açúcar, cânhamo, entre outras, podem servir como fonte de fibras em locais onde o fornecimento de madeira é escasso ou, ainda, na produção de tipos específicos de papéis de alta qualidade (HOCKING, 2005; BRACELPA, 2010).

As florestas artificiais ocupam a quarta posição em termos de área cultivada no Brasil, ficando apenas atrás da soja, do milho e da cana-de-açúcar. A maior parte dessas florestas destina-se à produção de papel e celulose, sendo que o país abriga a maior área superficial plantada com eucalipto do mundo. A principal razão para sua expansão acelerada no Brasil, é a velocidade com que o eucalipto se desenvolve em função do clima. Nos EUA e no Canadá, o crescimento pode levar até 70 anos, na Austrália, de onde o eucalipto é originário, requer 30 anos, enquanto que no Brasil são necessários apenas 7 anos (SCHLESINGER, 2008).

As plantações mercantis de eucalipto não interagem com a natureza, não há condições biológicas que permitam a sobrevivência da fauna nessas regiões e o alto consumo hídrico, característico de espécies como o eucalipto, tende a diminuir o volume de água disponível. Essas questões ainda são agravadas com o fato de o eucalipto não ser uma árvore nativa brasileira. Além disso, essas plantações são profundamente dependentes de agroquímicos e a contaminação dos solos e da água não pode ser evitada, ainda que os produtos químicos sejam aplicados de forma controlada. O setor de papel e celulose também gera impactos ambientais indiretos, como o elevado consumo de energia e água no processo produtivo (SCHLESINGER, 2008; TORRE, 2011).

O Brasil é o quarto maior produtor de celulose e o décimo maior produtor de papel no mundo. Destaca-se, internacionalmente, por produzir e abastecer o mercado com significativos volumes de papel de embalagem, papel cartão e papel de imprimir e escrever. O setor tem dado uma importante contribuição para a economia do país, sendo que papel e celulose juntos correspondem ao décimo produto brasileiro mais exportado. No Brasil, a celulose é predominantemente produzida a partir de processos químicos e, desde 1985, a produção por métodos mecânicos vem diminuindo gradativamente (BRACELPA, 2010; FAO, 2013).

O aumento de renda da população e o desenvolvimento socioeconômico insere novos consumidores no mercado, o que resulta em uma maior demanda por cadernos, livros, itens de higiene pessoal e embalagens. No período de 2000 a 2010, o Brasil, acompanhando as mudanças na economia, aumentou sua produção de papel em 27% e alcançou a marca de 10,3 milhões de toneladas de papel produzidas em 2012. É importante ressaltar que a madeira, matéria-prima predominantemente utilizada, é o principal custo no processo de fabricação de papel (BRACELPA, 2014).

### **3.3 Fibras vegetais**

As fibras vegetais são compósitos de fibrilas de celulose mantidos unidos por uma base de hemicelulose e lignina, que servem como uma defesa natural contra a degradação microbiana e garantem proteção mecânica ao vegetal (CASTRO, 2009). A madeira lenhosa típica é constituída de, aproximadamente, 40 a 50% de celulose, 20 a 30% de hemicelulose e 20 a 28% de lignina, além de menores porcentagens de outros componentes como os compostos inorgânicos e as moléculas extrativas, sendo que essas substâncias variam de acordo com a espécie (YU; LOU; WU, 2008).

A celulose é um homopolissacarídeo linear parte amorfo e parte cristalino, composto por monômeros de anidroglicose ( $C_6H_{12}O_6$ ) unidos entre si por ligações  $\beta$ -(1,4)-glicosídicas, formando microfibras. É a substância orgânica mais abundante no mundo e o principal componente da parede celular vegetal, sendo produzida somente por via biossintética (GALBE; ZACCHI, 2012; ZHANG; LYND, 2004; LIMA, 2001).

As hemiceluloses, também chamadas de polioses, são polissacarídeos ramificados de cadeias curtas e baixa massa molecular, formados pelos açúcares glicose, manose e galactose (hexoses) e xilose e arabinose (pentoses), e quantidades variáveis de ácidos urônicos e desoxi-hexoses em alguns tipos de madeira (LIMA, 2001). É importante ressaltar que, distintivamente da celulose que é caracterizada por um único tipo de monossacarídeo, o termo hemicelulose refere-se a uma classe de polímeros com composições variáveis e pelo menos dois tipos de unidades de açúcar (CHERTMAN, 2007; POTULSKI, 2012).

A lignina é uma macromolécula tridimensional, altamente ramificada, formada basicamente de unidades de fenilpropano acopladas de forma irregular e não repetitiva. Sendo um componente essencial para que uma planta seja considerada lenhosa, a lignina é uma resina que funciona como um cimento entre as fibras de madeira e um agente de reforço no interior das fibras. É frequentemente encontrada associada com celulose e hemicelulose, formando os compostos lignocelulósicos. Por possuir uma estrutura amorfa, há inúmeras interações possíveis entre as unidades individuais (YU; LOU; WU, 2008).

Os constituintes presentes em menores quantidades são comumente chamados de extrativos (solúveis em água e solventes orgânicos) e são formados, essencialmente, por compostos fenólicos e resinas (LIMA, 2001). Podem chegar a 10% da composição química da madeira, dependem da idade da planta e localização geográfica e concedem algumas características às plantas, como cor, cheiro e sabor (POTULSKI, 2012).

Na indústria de papel e celulose, a fibra virgem mais amplamente utilizada é proveniente da madeira, fazendo com que a exploração florestal seja exacerbada em algumas regiões do mundo. Dessa forma, a utilização de resíduos agrícolas para a produção de celulose merece atenção. Em alguns países asiáticos, como China, Índia e Vietnã, fibras provenientes de outras matérias-primas já representam uma parcela importante na indústria papeleira (PUITEL et al., 2015).

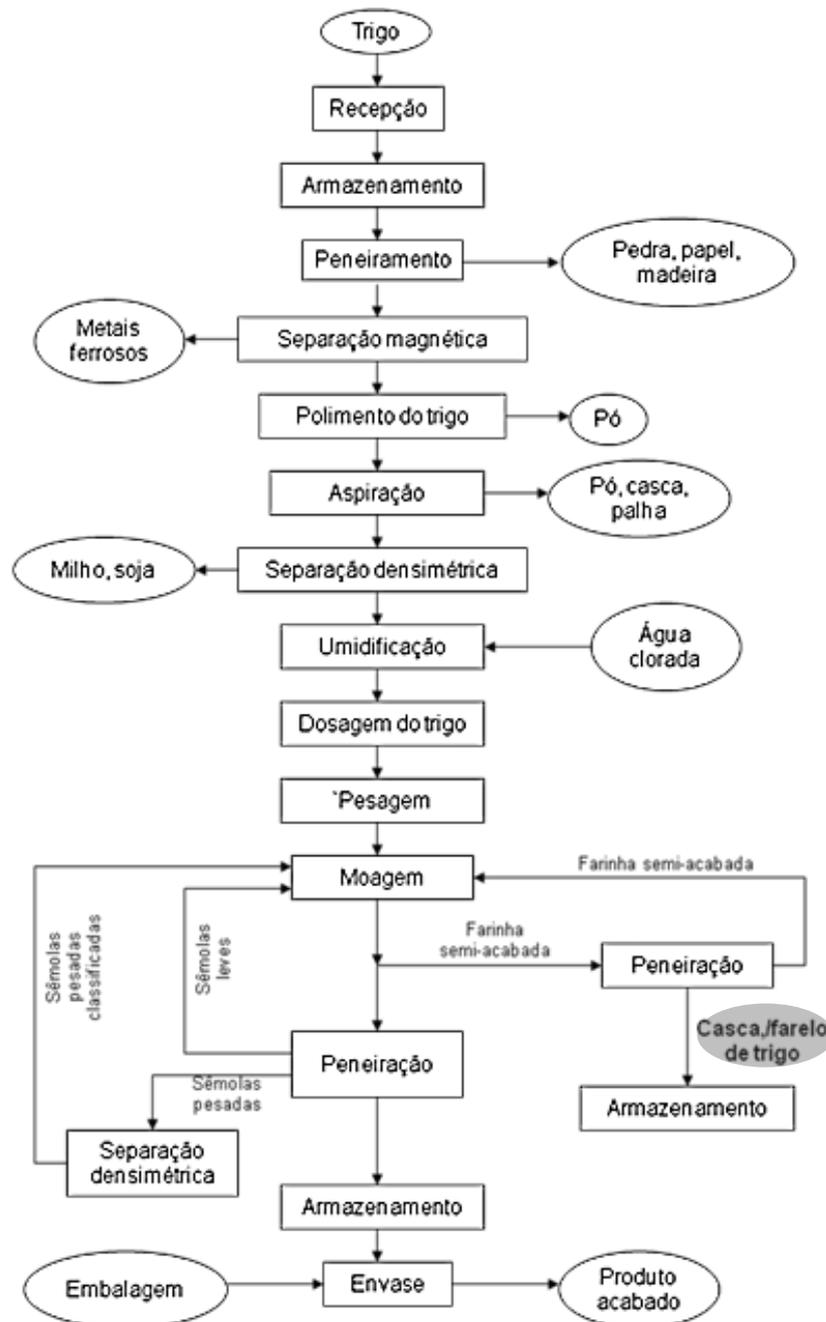
A geração mundial de resíduos lignocelulósicos ultrapassa a marca de milhões de toneladas por ano e constituem um recurso de grande potencial por serem fibras vegetais e fontes de carboidratos. Estes resíduos podem ser classificados em duas categorias: os resíduos deixados no campo após a colheita e os resíduos separados a partir do produto processado.

Os rejeitos de campo não podem ser realmente classificados como resíduos, uma vez que sua remoção afetaria a qualidade do solo e a produtividade da cultura. Contudo, vale ressaltar que a maioria dos resíduos gerados no processamento são queimados e, portanto, tem seu potencial desperdiçado. Diante disso, uma economia verde precisa ser estabelecida para o aproveitamento desses materiais (TUCK et al., 2012).

As vantagens das fontes alternativas de fibras incluem rápido crescimento, custos de colheita cobertos pela cultura principal, processamento de grãos abundante em diversos países e menor impacto no meio ambiente do que as fibras oriundas da madeira, sendo vantagens tanto de cunho ambiental quanto econômico. Por outro lado, as principais desvantagens em comparação com a madeira são baixa densidade, suscetibilidade ao apodrecimento, alta concentração de hemiceluloses, cinzas e extrativos. A baixa densidade destes materiais, a degradação rápida por podridão e outros problemas associados ao armazenamento, podem limitar suas utilizações como matérias-primas para a produção de papel, características que também afetam a logística do processamento dessas fibras. A alta concentração de hemiceluloses induz a um baixo rendimento da polpa devido à degradação nas fases iniciais de polpação. Os componentes químicos das cinzas são a principal causa de formação de depósitos em sistemas de recuperação química, enquanto que extrativos lipofílicos podem gerar diversos problemas de funcionamento como resultado da formação de depósitos e de espuma. Uma série de complicações na gestão dos efluentes, devida à presença de extrativos também tem sido relatada, portanto é necessária a pesquisa de novas matérias-primas e metodologias para que esses problemas possam ser solucionados. (NAVAEE-ARDEH; MOHAMMADI-ROVSHANDEH; POURJOOZI, 2004; PUITEL et al., 2015).

### **3.3.1 Farelo de trigo**

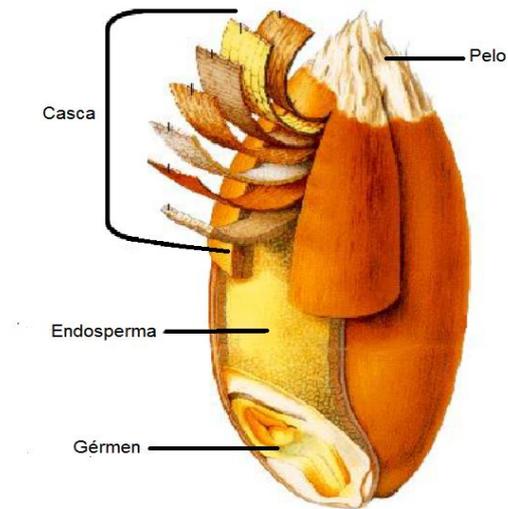
O trigo tem significativo peso na economia agrícola global, sendo o segundo cereal mais produzido no mundo. No Brasil, o trigo é cultivado nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste (BRASIL, 2012). Na Figura 4 é apresentado o fluxograma simplificado do processo de produção da farinha de trigo.



**Figura 4** Fluxograma simplificado do processo de obtenção da farinha de trigo.

**Fonte:** Adaptado de Pinto (2010).

A parte do grão de trigo que não é utilizada para produção de farinha é chamada de casca ou farelo de trigo, encontra-se em destaque no fluxograma e é um subproduto das indústrias moageiras de trigo. Na Figura 5 são apresentadas as divisões morfológicas do grão de trigo, com ressaltos para a casca que constitui grande parte do grão.



**Figura 5** Principais divisões morfológicas do grão de trigo.

**Fonte:** Adaptado de Pinto (2010).

Esse resíduo é utilizado por algumas indústrias como adubo, ração animal e fonte de energia para combustão. Pequenos produtores a utilizam na produção de artesanatos e, em alguns países da Europa, esse resíduo é utilizado na produção de papel, por ser rico em celulose e hemicelulose (CANILHA, 2006). Contudo, a maioria das indústrias ainda o considera como um resíduo, evidenciando-se a necessidade de procurar alternativas para o uso desse subproduto.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Material**

O farelo de trigo foi coletado em uma indústria moageira de trigo, localizada em Cascavel – PR. Todo o farelo utilizado na realização dos experimentos foi coletado da mesma moagem para garantir a homogeneidade do material.

A polpa de eucalipto foi obtida na Faculdade da Indústria Senai, unidade de Telêmaco Borba – PR.

O licor utilizado nos experimentos foi obtido a partir da diluição de uma solução de hidróxido de sódio 20% em laboratório.

### **4.2 Métodos**

Todos os experimentos foram realizados nos laboratórios de papel e celulose da Faculdade da Indústria Senai, unidade de Telêmaco Borba – PR.

#### **4.2.1 Caracterização do material**

Na caracterização do material foram realizadas análises de cinzas e de umidade, de acordo com IAL (2008), para determinação dos minerais totais e quantidade de água presentes na amostra.

#### **4.2.2 Cozimento da polpa**

Foram realizados três cozimentos: E1, E2 e E3, com quatro repetições cada, utilizando-se o processo soda em Reator Autoclave Rotatório REGMED (Figura 6) a 5,8 kgf de pressão, 5 rpm e temperatura de reação de 160°C. O reator utilizado possui 4 câmaras

com capacidade volumétrica de 2 litros cada. Um volume suficiente de licor é necessário para que todas as superfícies do material entrem em contato com o produto químico. O volume utilizado foi de 60% da capacidade total do reator para que houvesse uma homogeneização eficiente durante o processo de cozimento. Devido à baixa densidade do material e a disponibilidade da celulose nas fibras, a relação licor/farelo de trigo utilizada foi de 5:1, para reduzir a taxa de reação (SAIJONKARI-PAHKALA, 2001). A massa de farelo utilizada foi calculada em função da umidade do material e da concentração de álcali utilizada em cada ensaio. Após o cozimento, as polpas foram lavadas com água potável e tiveram seu rendimento calculado por meio da relação massa de farelo utilizada/massa de polpa obtida após o cozimento.



**Figura 6** Reator autoclave rotatório REGMED.

**Fonte:** A autora.

O primeiro cozimento (E1) foi realizado em função do Fator H. A concentração de álcali utilizada foi de 14% e o fator H esperado foi de 800. Para o cálculo desse parâmetro, utilizou-se uma planilha que possibilita o controle do processo de cozimento e calcula o fator H, em função dos dados de temperatura lançados. Assim sendo, o experimento foi conduzido cronometrando-se o tempo e registrando-se a temperatura na tabela a cada dois minutos até que o fator H proposto fosse atingido.

O rendimento do ensaio E1 não se mostrou satisfatório, devido à baixa densidade do material e à maior área superficial de contato com o licor em comparação com as fibras madeireiras. Desse modo, os outros ensaios foram conduzidos em função do tempo de reação, de acordo com Saijonkari-Pahkala (2001).

O segundo e terceiro experimentos (E2 e E3) foram realizados em função do tempo, fixado em 15 minutos. Dessa forma, o cozimento foi conduzido até o reator atingir a

temperatura especificada de 160 °C e mantido por 15 minutos. O reator foi então despressurizado e as câmaras foram imersas em água fria para interromper a reação. Utilizou-se uma concentração de álcali de 12% no segundo cozimento e 16% no terceiro (SAIJONKARI-PAHKALA, 2001). O licor do cozimento com maior rendimento teve seu pH, álcali residual e sólidos totais analisados e a polpa obtida foi utilizada para formação de folha.

#### 4.2.3 Formação de folha

A confecção das folhas de papel foi realizada nas proporções de 0, 10, 20, 30, 40 e 50% de polpa de farelo de trigo com polpa de eucalipto na gramatura de 200 g m<sup>-2</sup>. Foram confeccionadas 5 folhas de cada proporção, de acordo com as normas ISO 5269/2 e TAPPI T205 sp-02, utilizando-se o Formador de folhas REGMED (Figura 7). O papel produzido foi acondicionado a 23 °C (±2 °C) e 50% (±2%) de umidade relativa do ar, segundo a norma TAPPI T402 sp-08 até realização dos testes de qualidade.



**Figura 7** Formador de folhas REGMED.

**Fonte:** A autora.

#### 4.2.4 Testes de qualidade

Para determinar as características e a qualidade do papel produzido, foram realizados os testes a seguir, obedecendo-se as recomendações das normas relacionadas. Para cada proporção de farelo utilizada, foram realizadas três repetições.

- Gramatura: a medição foi realizada em uma balança analítica, utilizando-se corpos de prova condicionados com área determinada. O ensaio foi realizado de acordo com a norma TAPPI T220 sp-01;
- Espessura: definida como a distância em milímetros entre as duas superfícies predominantes do papel, medida sob pressão constante ( $50 \pm 2$  kPa) em micrômetro padronizado que possui dois discos planos paralelos, entre os quais se coloca o corpo de prova. A análise foi conduzida de acordo com a norma TAPPI T220 sp-01;
- Densidade aparente: é a relação entre a gramatura em gramas por metro quadrado ( $\text{g m}^{-2}$ ) e a espessura em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ). O resultado é expresso em gramas por centímetros cúbicos ( $\text{g cm}^{-3}$ ). Esse dado foi calculado pelo coeficiente dos resultados obtidos para gramatura e espessura;
- Resistência à tração: essa medida foi determinada submetendo-se um corpo de prova de medidas especificadas a um esforço de tração uniformemente crescente até a sua ruptura. O ensaio foi executado de acordo com a norma TAPPI T494 om-01.
- Resistência ao arrebatamento: é a pressão máxima uniforme suportada por um corpo de prova de papel numa área de 30,5 mm de diâmetro. O ensaio foi realizado de acordo com a norma ISO 2758.

Os resultados obtidos nos testes de qualidade para cada proporção de polpa de farelo foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Para essa análise, utilizou-se o *Software R Project*.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Caracterização do material**

Na caracterização do farelo de trigo, a umidade em base seca obtida foi de 10,6% e o teor de cinzas foi de 8,82%. A umidade é um fator importante na fabricação do papel, tanto para poder armazenar a matéria-prima por longos períodos de tempo sem que suas características físico-químicas sejam alteradas quanto para o cozimento, uma vez que, quanto menor o volume de água presente na matéria-prima maior a quantidade dos demais elementos químicos, tais como celulose, hemicelulose e lignina. A quantidade de água encontrada para o farelo de trigo é satisfatória e bastante próxima aos valores encontrados para a madeira após secagem que, usualmente, estão entre 10 e 15% (SILVEIRA; REZENDE; VALE, 2013).

O teor de cinzas, contudo, foi bastante elevado quando comparado ao teor de cinzas da madeira que, geralmente, é menor que 1%. Fibras vegetais não provenientes de madeira possuem alta concentração de minerais e sílica, que são dissolvidos no licor durante o cozimento e dificultam o processo de recuperação química. O aumento da viscosidade, a alta concentração de sólidos e a deposição de materiais durante a cadeia de recuperação, dificultam o bombeamento do licor, tornando a recuperação química menos eficiente e mais custosa. É importante ressaltar que sem a recuperação química, o processo de polpação é extremamente poluente e inviável, sendo a principal desvantagem na utilização de fibras não provenientes da madeira (ADRIAANSE; MORSINK, 2007).

### **5.2 Cozimento da polpa**

O provimento de álcali suficiente para que as reações de cozimento se deem por completas é essencial. Um excesso de produto químico é utilizado para manter a reação até o fim e prevenir a disposição do material dissolvido de volta às fibras. Para determinar a quantidade de farelo, álcali e água que seriam utilizadas no cozimento, uma planilha costumeiramente utilizada no cozimento da madeira, foi adaptada para o farelo de trigo.

O ensaio E1 foi realizado em função de um fator H de 800 e o tempo final de cozimento foi de 36 minutos. Para o farelo de trigo, contudo, utilizar esse parâmetro para conduzir o cozimento, não foi satisfatório, pois o rendimento obtido no primeiro cozimento foi de apenas 18,6%. A concentração de celulose no farelo de trigo é de, aproximadamente, 40%, o que significa que apenas metade da celulose presente pôde ser reaproveitada. Isso se deve ao fato de que um fator H de 800 é usualmente utilizado para amostras de madeira, que possuem alta densidade e uma área superficial de contato menor com o licor (ADRIAANSE; MORSINK, 2007).

Os ensaios E2 e E3 foram realizados em função do tempo, fixado em 15 minutos, e tiveram rendimentos de 35,08 e 29,11%, respectivamente. Ambos os cozimentos tiveram rendimentos satisfatórios em função do teor de celulose presente no farelo de trigo, contudo, somente o experimento E2 foi selecionado para prosseguir as análises, devido à menor concentração de álcali utilizada e seu maior rendimento, dado que a prática usual nas operações em grande escala para manter a viabilidade econômica do processo é utilizar a carga de álcali mínima praticável.

O licor do cozimento E2 foi analisado em função do pH, álcali residual e sólidos totais. Todas as análises foram realizadas em cada uma das câmaras e as médias dos resultados obtidos encontram-se na Tabela 1.

**Tabela 1** Resultados da análise físico-química do licor do segundo cozimento

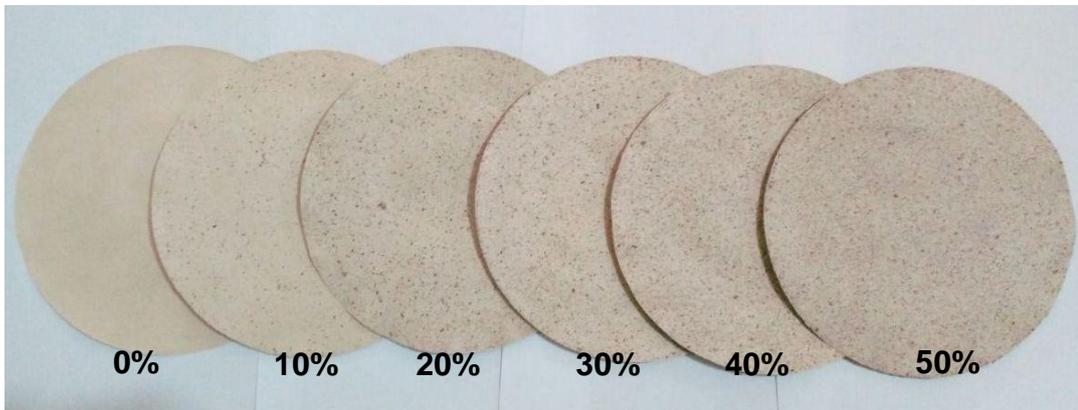
Análise	Resultado
pH	10,686
Álcali residual	2,80%
Sólidos totais	17,65%

O álcali residual é de extrema importância na indústria papelreira. É necessário que uma pequena quantidade de álcali permaneça durante todo o processo de polpação para que as substâncias que foram digeridas, continuem solubilizadas no licor até o término do processo. O valor de álcali residual encontrado está de acordo com o esperado (ALVES et al., 2015).

No processo de recuperação química, a primeira etapa é a evaporação, em que o teor de sólidos do licor é elevado a, aproximadamente, 20% para, em seguida, ser queimado nas caldeiras de recuperação. Pode se observar que o valor encontrado está muito próximo de 20%, o que dificultaria bastante esse processo e se caracteriza como a principal desvantagem do uso de matérias-primas alternativas (ALVES et al., 2015).

### 5.3 Formação de folha

A polpa de farelo de trigo utilizada para a formação de folha foi proveniente do experimento E2, cujos parâmetros foram 12% de álcali e 15 minutos de tempo após atingir a temperatura de 160 °C. Já a polpa de eucalipto utilizada foi preparada com 15% de álcali e um fator H de 800. Foram confeccionadas 5 folhas de cada proporção (0, 10, 20, 30, 40 e 50%), de acordo com as normas ISO 5269/2 e TAPPI T205 sp-02, de modo que, em seguida, pudessem ser submetidas aos testes de qualidade propostos. Na Figura 8, pode-se observar um exemplar de cada uma das proporções utilizadas.



**Figura 8** Papel produzido com o farelo de trigo e polpa de eucalipto combinados.

**Fonte:** A autora.

Devido ao tamanho das partículas do farelo de trigo, não foi possível utilizar uma proporção polpa de farelo/polpa de madeira maior que 50%, uma vez que partículas da polpa de farelo ficavam presas na tela do equipamento por onde a água é drenada.

As fibras provenientes de árvores coníferas são mais longas do que as provenientes de outras plantas. Fibras longas conferem ao papel rigidez e resistência, enquanto que fibras mais curtas contribuem com a opacidade, imprimibilidade e solidez. Assim, uma mistura de polpas com fibras de diferentes tamanhos faz-se interessante para melhorar a qualidade do papel (SAIJONKARI-PAHKALA, 2001).

Em razão do apelo ecológico do papel produzido, optou-se por não se realizar nenhum tipo de tratamento ou adicionar aditivos e, também, não se realizou o processo de branqueamento, uma vez que, com esses processos, mais resíduos seriam gerados. Os aditivos utilizados na indústria papelreira aumentam a durabilidade e a qualidade do papel e são definidos de acordo com o destino final deste, isto é, a função para o qual o papel é destinado. Um papel de gramatura 200 g m<sup>-2</sup>, usualmente, é destinado a embalagens ou

papéis especiais após receber o tratamento adequado, como papel cartão, papel *couché*, papéis com textura etc.

#### 5.4 Testes de qualidade

Após a fabricação do papel, três corpos de prova de cada proporção farelo/madeira foram submetidos aos testes de qualidade citados anteriormente. As médias dos resultados obtidos encontram-se na Tabela 2.

**Tabela 2** Resultados obtidos nos testes de qualidade

Proporção de farelo	Gramatura (g m <sup>-2</sup> )	Espessura (nm)	Densidade aparente	Resistência a tração (N)	Resistência ao arrebatamento (kPa)
0%	210,4	255,5	0,82	62,85	265,45
10%	216,2	242,0	0,89	65,19	266,15
20%	213,5	255,0	0,84	65,31	261,43
30%	215,3	234,5	0,92	66,45	266,07
40%	211,3	233,0	0,91	66,40	262,12
50%	215,4	253,5	0,85	66,99	265,80

A gramatura do papel afeta a maioria das propriedades, principalmente as mecânicas e as ópticas e, ainda que seja pré-definida para a formação do papel, pode ser irregular, uma vez que as folhas foram fabricadas uma a uma no equipamento utilizado. Os resultados obtidos demonstram que há uma homogeneidade entre as amostras.

A espessura é afetada pela composição fibrosa, grau de refino e, principalmente, pela calandragem, também afeta as propriedades mecânicas e ópticas do papel e é relevante para a função a qual o papel é destinado. Tendo sido produzido em escala piloto, a espessura do papel pode ficar irregular, contudo, observa-se uma uniformização nas proporções analisadas.

Por incluir os espaços do papel preenchidos por ar, a densidade aparente é assim denominada, e é considerada uma das mais importantes propriedades do papel, influenciando as propriedades físicas e ópticas (CIT, 2013).

A resistência do papel é muito importante, uma vez que o papel deve resistir aos esforços a que é submetido durante o processo produtivo e, posteriormente, durante o uso. A maneira de o papel resistir à ação de forças externas depende de diversos fatores, tais como sua composição fibrosa e sua formação (CIT, 2013).

Nenhum dos ensaios de resistência realizados é uma medida fundamental, mas uma combinação de vários fatores, como flexibilidade, ligações e resistência das fibras. Tais

fatores dependem, dentre outros aspectos, como o tipo de fibras, do seu comprimento e espessura, bem como da flexibilidade das fibras individuais, do número de ligações entre elas, da resistência das ligações individuais, da gramatura do papel e da densidade aparente (CIT, 2013).

Para avaliar se o papel produzido manteve sua resistência, nas diversas proporções de polpa de farelo de trigo utilizadas, as médias dos resultados obtidos nos testes de resistência à tração e ao arrebatamento foram submetidas à análise de variância (ANOVA) com 5% de significância. Os resultados obtidos encontram-se nas Tabelas 3 e 4.

**Tabela 3** ANOVA – Resistência a tração

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	F <sub>cal</sub>	p-valor	F <sub>tab</sub>
Proporção de farelo	33,34356	5	6,668712	0,4045	0,83662	3,105875
Resíduo	197,8355	12	16,48629			
Total	231,179	17				

**Tabela 4** ANOVA – Resistência ao arrebatamento

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	F <sub>cal</sub>	p-valor	F <sub>tab</sub>
Proporção de farelo	68,56236	5	13,71247	0,736454	0,610328	3,105875
Resíduo	223,435	12	18,61958			
Total	291,9974	17				

Analisando-se os resultados obtidos nas análises de variância, pode-se observar que  $p\text{-valor} > \alpha$  e  $F_{cal} < F_{tab}$ , logo, não há diferença significativa entre os tratamentos. Diante disso, pode-se concluir que é possível substituir a polpa de madeira em até 50% pela polpa de farelo, sem modificações nos equipamentos atualmente utilizados e sem que haja alterações nas características físico-mecânicas do papel, como resistência e rigidez, fazendo com que sua utilidade e durabilidade sejam mantidas nas proporções estudadas.

## 6 CONCLUSÕES

Nas circunstâncias de realização desse trabalho, foi possível concluir que:

- o rendimento obtido com o cozimento da polpa de farelo de trigo foi satisfatório, uma vez que a maioria da celulose/hemicelulose presente pode ser aproveitada;
- o licor permaneceu com quantidade de álcali residual suficiente para prosseguir com a recuperação e reutilização;
- foi possível utilizar o farelo de trigo como matéria-prima para produção de papel em combinação com polpa de eucalipto, numa proporção de até 50% sem que fosse necessário modificar o processo e equipamentos usualmente utilizados na indústria de papel e celulose;
- os papéis produzidos tiveram qualidade semelhante em todas as proporções de farelo de trigo utilizadas, mostrando que, ainda que 50% da matéria-prima seja substituída, o papel tende a manter sua qualidade;
- em razão da gramatura e da não adição de aditivos, o papel produzido pode ser destinado à produção de embalagens e papéis especiais.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante a realização dessa pesquisa, assumiu-se o desafio de buscar uma alternativa ao papel atualmente produzido. A principal inovação foi a matéria-prima escolhida, que consiste de um subproduto da indústria moageira de trigo, considerado por muitos como um resíduo. Buscou-se manter os processos e equipamentos já utilizados na indústria papeleira, de modo que o papel produzido fosse economicamente viável. A principal dificuldade encontrada foi o tamanho reduzido das partículas do farelo de trigo, que dificultam o processo de formação de folha e também a recuperação/tratamento do licor negro. Os ensaios foram realizados somente em escala piloto, portanto, este trabalho abre caminho para futuros estudos em escala industrial e para que empresas possam introduzir uma matéria-prima alternativa, economicamente vantajosa e com qualidade semelhante à atualmente utilizada na produção de papel.

**REFERÊNCIAS**

- ADRIAANSE, M.; MORSINK, H. **Report: Non-wood fibre for Papermaking**, 2007.
- ALVES, E. D.; COSTA, A. O; COSTA JR., E. F.; PINHEIRO, O. S. Estudo do processo de obtenção celulose Kraft com ênfase no forno de cal. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 16, n. 26, p. 101-220, jul./dez. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL - BRACELPA **Características gerais do setor de papel e celulose**. São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://bracelpa.org.br/bra2/index.php>> Acesso em: 28 jan. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL - BRACELPA **Relatório estatístico 2013/2014**. São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/conjuntura/CB-064.pdf>> Acesso em: 04 fev. 2016.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/trigo>> Acesso em: 9 jun. 2015.
- BRASILEIRO, L. B; MOREIRA, J. E. B.; REIS, I. N.; SANTOS, C. P. Papel: como se fabrica? **Revista Química Nova na Escola**, São Paulo, n. 14, nov. p. 3-7, 2001.
- CANILHA, L. **Produção de xilitol no hidrolisado hemicelulósico de palha de trigo**. 2006. 171 f. Tese (Doutorado em Biotecnologia Industrial) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2006.
- CASTRO, H. F. de **Papel e celulose**. Lorena: Universidade de São Paulo/EEL, 2009. Apostila. 30 p.
- CHERTMAN, M. **Secagem de papel produzido a partir do pseudocaule da bananeira**. 2007. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- CIT, E. J. **Influência da mistura de fibras de *Eucalyptus dunnii* M. e *Pinus taeda* L. de processo “Kraft” nas propriedades do papel**. 2013. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- CORAIOLA, M.; MARIOTTO, S. C. Proposta metodológica para produção artesanal de papel utilizando a fibra do pseudocaule de bananeira. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 7, n. 2, p. 207-216, abr./jun. 2009.
- DURÁN, N.; ESPOSITO, E.; PERALTA-ZAMORA, P.; REYES, J. Remediação de efluentes derivados da indústria de papel e celulose. Tratamento biológico e fotocatalítico. **Revista Química Nova**, São Paulo, v. 20, n. 2, 1997.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **FAOStat Forestry**. 2013. Base de dados de produção, importação e exportação de produtos florestais. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/browse/F/FO/E>> Acesso em: 16 out. 2015.

FRACARO, G. P. M. **Eficiência energética e intensidade de emissões no setor de papel e celulose brasileiro**. 2012. 90 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

GALBE, M.; ZACCHI, G. Pretreatment: The key to efficient utilization of lignocellulosic materials. **Biomass and Bioenergy**, v. 46, p. 70–78, 2012.

HOCKING, M. B. Production of pulp and paper. **Handbook of Chemical Technology and Pollution Control**. 3. ed. San Diego: Academic Press, p. 453-504, 2005.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ - IAL. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 1. ed. digital. São Paulo, 2008. Disponível em: <[http://www.ial.sp.gov.br/resources/editorinplace/ial/2016\\_3\\_19/analisedealimentosial\\_2008.pdf](http://www.ial.sp.gov.br/resources/editorinplace/ial/2016_3_19/analisedealimentosial_2008.pdf)> Acesso em 12 nov. 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **ISO 5269/2**. Pulps – Preparation of laboratory sheets for physical testing. Specifies a method, using a Rapid-Köthen sheet former, for the preparation of laboratory sheets of pulp for the purpose of carrying out subsequent physical tests on these sheets in order to assess the relevant properties of the pulp itself. Switzerland: ISO, 2004.

LIMA, U. A. **Biotecnologia industrial**: processos fermentativos e enzimáticos. São Paulo - SP: Blücher, 2001. v.3 593 p.

LÓPEZ, F.; PÉREZ, A; GARCÍA, J. C.; FERIA, M. J.; GARCÍA, M. M.; FERNÁNDEZ, M. Cellulosic pulp from *Leucaena diversifolia* by soda-ethanol pulping process. **Chemical Engineering Journal**, v. 166, n. 1, p. 22–29, 2011.

NAVAEE-ARDEH, S.; MOHAMMADI-ROVSHANDEH, J.; POURJOOZI, M. Influence of rice straw cooking conditions in the soda-ethanol-water pulping on the mechanical properties of produced paper sheets. **Bioresource Technology**, v. 92, p. 65–69, 2004.

NAVARRO, R. M. S.; NAVARRO, F. M. S.; TAMBOURGI, E. B. Estudo de diferentes processos de obtenção da pasta celulósica para fabricação de papel. **Revista Ciências e Tecnologia**, Recife - PE, n. 1, Ano 1, p. 1-5, jul./dez., 2007.

NEVES, J. M.; ROJA, M. L. Caracterização de fibras de bananeira “nanição” (Musa Grupo AAA, “Giant Cavendish”) como possível matéria-prima para produção de pasta celulósica para fabricação de papel. In: CONGRESO ÍBEROAMERICANO DE INVESTIGACION EN CELULOSA Y PAPEL, 2002. Campinas - SP. Campinas: CIADICYP, 2002. 1 CDROM.

PINTO, R. R. **Balanco de massa do processo de produção de farinha de trigo**. 2010. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

POTULSKI, D. C. **Efeito da incorporação de microfibrilas de celulose sobre as propriedades do papel**. 2012. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

PUITEL, A. C.; MARIN, N.; PUIU, P.; GAVRILESCU, D. Lignocellulosic agricultural residues – a virgin fibre supply solution for paper-based packaging. **Cellulose Chemistry and Technology**, Romênia, v. 49, p. 633–639, 2015.

SAIJONKARI-PAHKALA, K. Non-wood plants as raw material for pulp and paper. Dissertation academic. **Agricultural and Food Science in Finland**. Finland, 2001.

SAMISTRARO, G.; MUNIZ, G. J. B.; PERALTA-ZAMORA, P.; CORDEIRO, G. A. Previsão das propriedades físicas do papel kraft por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) e regressão por mínimos quadrados parciais (PLS). **Química Nova**, São Paulo - SP, v. 32, n. 6, p. 1422–1425, 2009.

SCHLESINGER, S. **Lenha nova para a velha fornalha: a febre dos agrocombustíveis**. 1. ed. Rio de Janeiro - RJ: FASE, 2008. 112 p.

SÉKULA, P. R. **Uso de modelo de referência para melhoria do processo de fabricação de papel kraft**. 2011. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2011.

SHREVE, R. N.; BRINK JÚNIOR, J. A. **Indústrias de processos químicos**. 4. ed. Rio de Janeiro - RJ: Guanabara Koogan, 1977. 717 p.

SILVEIRA, L. H. C.; REZENDE, A. V.; VALE, A. T. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. **Acta Amazônica**. Brasília. 2013.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI. T 220 sp-01 **Physical testing of pulp handsheets**, 2001.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI. T 205 sp-02 **Forming handsheets for physical tests of pulp**, 2006.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI. T 494 om-01 **Tensile properties of paper and paperboard (using constant rate of elongation apparatus)**, 2006.

TORRE, W. G. Eucalipto: o verde enganador. **Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros**, Três Lagoas – MG, n. 13, Ano 8, mai., s/p., 2011.

TUCK, C. O.; PÉREZ, E.; HORVÁTH, I. T. SHELDON, R. A.; POLIAKOFF, M. Valorization of biomass: deriving more value from waste. **Science**, EUA, v. 337, p. 695-699, aug. 2012.

TUTUS, A.; ATEŞ, S.; DENİZ, I. Pulp and paper production from Spruce wood with kraft and modified kraft methods. **African Journal of Biotechnology**, Quênia, v. 9, n. 11, p. 1648-1654, 2010.

VAN HEININGEN, A. Converting a kraft pulp mill into an integrated forest biorefinery. **Pulp and Paper Canada**, Toronto, v. 107, n. 6, p. 38–43, 2006.

WORRELL, E.; PRICE, L.; NEELIS, M.; GALITSKY, C.; NAN, Z. **World best practice energy intensity values for selected industrial sectors**. Ernest Orlando Lawrence. Berkeley National Laboratory, Environmental Energy. Technologies Division. EUA, 2008. 51 p.

YU, Y.; LOU, X.; WU, H. Some recent advances in hydrolysis of biomass in hot-compressed water and its comparisons with other hydrolysis methods. **Energy and Fuels**, EUA, v. 22, n. 1, p. 46–60, 2008.

ZHANG, Y. H. P.; LYND, L. R. Toward an aggregated understanding of enzymatic hydrolysis of cellulose: Noncomplexed cellulase systems. **Biotechnology and Bioengineering**, EUA, v. 88, n. 7, p. 797–824, 2004.