



# SELEÇÃO DE PROCESSO DE POLPEAMENTO DE CELULOSE FLEXÍVEL A DIFERENTES MATERIAIS VEGETAIS FRENTE A CRITÉRIOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS DA SUSTENTABILIDADE

**Liziane Seben**

*(Universidade Federal do Rio Grande do Sul)*

**Istefani Carísio de Paula**

*(Universidade Federal do Rio Grande do Sul)*

**Samanta Guimarães Viana**

*(Universidade Federal do Rio Grande do Sul)*

## **Resumo**

*A preocupação por melhoria nos processos existentes e desenvolvimento de novos processos desencadeia a procura por materiais e processos que proporcionem tais avanços. O objetivo deste trabalho foi selecionar um processo de polpeamento de celulose flexível ao uso de materiais vegetais de fonte não-madeira a partir da determinação de critérios econômicos e ambientais da sustentabilidade. Logo, este estudo mostra as abordagens que tratam da sustentabilidade e que podem ser aplicáveis aos processos produtivos. A partir destas abordagens foram descritas diretrizes que serviriam de critérios para a análise de processos de polpeamento de celulose com enfoque no caráter ambiental e econômico dos mesmos. Logo, a avaliação quanto ao uso destes critérios foi feita ao analisar processos industriais de polpeamento de celulose através de pesquisa em material bibliográfico e da opinião de especialistas do meio. A análise dos processos industriais de polpeamento de celulose mostrou as práticas desenvolvidas no setor frente aos requisitos de sustentabilidade e as tendências para a melhoria de processos a fim de torná-los mais sustentáveis, bem como levou à seleção do mais flexível a diferentes materiais vegetais.*

*Palavras-chaves: Sustentabilidade; abordagens sustentáveis; processos de polpeamento de celulose; celulose; análise de impactos ambientais.*

## 1. INTRODUÇÃO

No contexto atual as práticas acerca de sustentabilidade têm se destacado como meio de propor inovações ou melhorias no desenvolvimento de produtos ou processos nas empresas. Conceitos de redução de impacto ambiental, associados a ganhos econômicos têm ganhado destaque e entre os mais abordados aparece a eco-eficiência, a qual combina os benefícios econômicos com o uso mais eficiente dos recursos e a prevenção de emissões, baseada na idéia de “produzir mais com menos” (WBCSD, 1998). Em busca da eco-eficiência os gestores necessitam de suporte, seja no formato de diretrizes, ferramentas, métodos ou estratégias, para transformar seus processos produtivos (MANZINI e VEZZOLI, 2002).

Um caso para avaliação de sustentabilidade é o setor de papel e celulose, que no Brasil apresenta grande relevância ambiental, econômica e social (LINS e OUCHI, 2007). Em função do seu impacto ambiental direto, devido à emissão de gases do efeito estufa, à geração de resíduos e ao descarte de efluentes, os Órgãos Reguladores no país impõem fortes exigências ambientais às empresas do setor. Por isso, observa-se um esforço do setor em rever os processos com vistas à economia e reuso de água, economia de energia e adoção de fontes alternativas de matéria-prima e reduzir o consumo de recursos materiais (LINS e OUCHI, 2007; SOUZA et al., 2008; LINS e ZYLBERSTAJN, 2010). Os processos de polpeamento de polpa celulósica são a maior fonte de impactos ambientais na indústria de polpa e papel (EPA, 2010). Todavia, as condições de processo e matérias-primas utilizadas são fatores ajustáveis que podem colaborar para o bom desempenho dos processos: escolha por matéria-prima oriunda de resíduos de outro processo, viabilidade de reuso de energia e materiais.

Dentre as abordagens que tratam de sustentabilidade, discutidas tanto nas organizações quanto na academia, estão: Método ZERI (Zero Emissions Research & Initiatives) (PAULI, 1996; PAULI, 1998), Berço a Berço (McDONOUGH e BRAUNGART, 2002), Produção Limpa (GREENPEACE, 1997), Engenharia Verde (ANASTAS e ZIMMERMAN, 2003), Química Verde (ANASTAS e WARNER, 1998), Produção mais Limpa (P+L) (CNTL, 2003), Design for Environment (DfE) ou Ecodesign ( KAZAZIAN, 2005; VEZZOLI e MANZINI, 2008) e Cadeia de Suprimentos Verde (EPA, 2000; SRIVASTARA 2007).

O objetivo deste trabalho foi selecionar um processo de polpeamento de celulose flexível ao uso de materiais vegetais de fonte não-madeira a partir da determinação de critérios econômicos e ambientais da sustentabilidade. Este trabalho não tem a pretensão de criar um novo processo industrial de polpeamento e está limitado a analisar a etapa de transformação da matéria-prima até a obtenção da polpa (polpeamento), resíduos e emissões geradas e *set ups* no caso de processos descontínuos. Neste trabalho o aspecto de ganho econômico considera a possibilidade de reaproveitar recursos e energia dentro do processo, além do uso eficiente destes recursos com mínimo de desperdício evitando o acúmulo de resíduos para tratamento posterior.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

Nesta etapa são mostrados os processos de polpeamento de celulose e as abordagens que tratam de sustentabilidade.

### **2.1 Processos industriais de polpeamento de celulose**

Os processos de polpeamento se propõem a remover a lignina presente nos materiais vegetais lignocelulósicos a fim de gerar uma polpa com alto teor de fibras. Na indústria de celulose e papel a maior parte dos poluentes emitidos pelas operações industriais ocorre nas etapas de polpeamento e branqueamento, onde há uso de vários componentes químicos, sendo que esta última operação não pertence ao escopo deste trabalho.

#### **2.1.1 Processos Ácidos**

O processo sulfito baseia-se no emprego de soluções ácidas de íons sulfito ( $\text{SO}_3^{2-}$ ) ou bissulfito ( $\text{HSO}_3^-$ ), que caracterizam a solução aquosa com dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) livre e dióxido de enxofre em forma combinada. Na solução aquosa é adicionada uma solução alcalina tais como ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ),  $\text{NaOH}$ ,  $\text{NH}_4\text{OH}$  e ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) entretanto a mais aplicada comercialmente é a solução de ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), uma vez que seu sistema de recuperação é facilitado, tanto para os reagentes químicos quanto para a recuperação energética.

Os aspectos positivos do processo sulfito baseiam-se no fato deste produzir uma polpa clara, de branqueamento facilitado e desta polpa poder ser refinada mais rapidamente e com menor gasto de energia mecânica. Entretanto, o processo tem as grandes desvantagens de não poder ser aplicado a toda e qualquer espécie vegetal, necessitar de maiores períodos de tempo de

cozimento e a gerar uma pasta menos resistente devido à maior degradação da celulose (SIXTA, 2006; EPA, 2010).

### **2.1.2 Processos Alcalinos**

Existem dois processos principais de polpeamento alcalino, que são o processo soda e o processo sulfato, este último chamado de Kraft. Em ambos, o hidróxido de sódio (NaOH) é o reagente em maior quantidade no licor de cozimento e no processo sulfato, sulfeto de sódio (Na<sub>2</sub>S) também está presente, numa proporção de aproximada de 75% de Na<sub>2</sub>S e 25% de NaOH.). O processo Kraft teve seu uso mais difundido do que o soda devido aos benefícios econômicos da recuperação dos agentes químicos, evitando liberação destes para o meio ambiente, melhorias de rendimento e qualidade da polpa (polpa produzida por percentual de matéria-prima) (EPA, 2010). Este processo é também flexível, pois é adaptável a vários tipos distintos de matéria prima, além de possibilitar a recuperação de reagentes químicos para formação do licor de cozimento e geração de energia (EPA, 2010) Todavia, o processo soda é recomendado na produção de celulose a partir de palhas, bagaços e outros resíduos agrícolas.

A maior seletividade do processo Kraft se comparado com o soda refere-se a maior habilidade do primeiro na remoção de lignina sem a degradação excessiva das fibras no material vegetal (SMOOK, 1994). A desvantagem do uso do sulfeto no licor Kraft consiste na liberação de compostos orgânicos malcheirosos e tóxicos, tais como de metilmercaptanas (CH<sub>3</sub>SH), dimetilssulfeto (CH<sub>3</sub>SCH<sub>3</sub>), dimetildissulfeto (CH<sub>3</sub>SSCH<sub>3</sub>) e outros compostos reduzidos de enxofre, referidos como “total reduced sulfur” (TRS) que são formados na deslignificação (D’ALMEIDA, 1988; SIXTA, 2006). Tais compostos são rigorosamente controlados nas indústrias de celulose, pois têm que atender exigências ambientais (SIXTA, 2006).

Processos alcalinos permitem o uso de aditivos químicos, com a finalidade de conduzir a benefícios econômicos e ambientais. Tais aditivos proporcionam o aumento da eficiência das reações de polpação, permitindo a redução da carga alcalina e compostos de enxofre, seguida da menor poluição odorífica, sendo uma alternativa para aplicações industriais. O uso da antraquinona (C<sub>14</sub>H<sub>8</sub>O<sub>2</sub>) como aditivo nos dois principais processos alcalinos impacta nas reações de deslignificação promovendo uma maior taxa de deslignificação e menor degradação dos carboidratos, agindo assim, contra alguns dos principais mecanismos responsáveis pelo baixo rendimento da polpação alcalina (SIXTA, 2006). Estudos revelam que o efeito da antraquinona é mais pronunciado na polpação soda quando comparado com a

polpação Kraft, ou seja, seu efeito é mais pronunciado em deslignificações com menor teor de sulfidez. (HOLTON, 1977).

## **2.2 Abordagens que tratam de sustentabilidade**

Mesmo ao se considerar uma única empresa ou setor, cada uma das etapas da criação de um produto gera *inputs* (energia, recursos) e *outputs* que terão impactos no meio ambiente, além dos produtos. Tais etapas devem ser analisadas desde a concepção do produto, pois cada uma contém potencial de melhoria ambiental, que incluem a escolha das matérias-primas, das tecnologias e dos processos de fabricação e valorização dos resíduos do produto. Na busca do melhor arranjo entre a viabilidade técnica, o controle de custos e o meio ambiente, o projetista seleciona e define soluções a respeito de todo o ciclo de vida do produto, analisando o conjunto dos impactos ambientais (KAZAZIAN, 2005). Para auxiliar as escolhas feitas pelos mesmos, é pertinente buscar abordagens que tratam de sustentabilidade e conhecer as diretrizes para melhoria de processos rumo à sustentabilidade ou desenvolvimento de produtos. Dentre as abordagens estão: Método ZERI, Berço a Berço, Ecodesign, Produção Limpa, entre outras.

### **2.2.1 Método ZERI**

Esta abordagem sistêmica, proposta por Pauli (1996) defende que ao projetar produtos e desenvolver sistemas produtivos, os resíduos de uma atividade devem ser considerados matéria-prima para outra. Tem por objetivo emissão zero nos sistemas, baseando-se em projetos com ênfase no ciclo de vida e estratégias econômicas, ecológicas, de metabolismo no sistema e ecoliteracy, que representa o quanto o indivíduo entende sobre o sistema natural em que vive integrado com a natureza (PAULI, 1996; PAULI, 1998).

### **2.2.2 Cadeia de suprimentos verde**

A cadeia de suprimentos verde é definida como a interação entre as organizações, dentro da cadeia de produção, com relação à prevenção da poluição na fonte, o que pode ocorrer a montante, em negociações com fornecedores, ou à jusante, no contato com consumidores (VACHON e KLASSEN, 2006). Esta abordagem trata da integração do meio-ambiente e da gestão da cadeia de suprimentos, para atividades relacionadas à concepção do produto, definição e seleção das fontes de matéria-prima, entrega do produto final ao consumidor e gestão do fim-de-vida do produto após seu uso (SRIVASTARA, 2007). As informações a respeito de meio-ambiente servem de base para aumentar o desempenho econômico dos

negócios, para isso os autores sugerem diretrizes para as empresas melhorarem seus desempenhos econômicos e ambientais abordando explicitamente os custos ambientais.

### **2.2.3 Berço a Berço**

Esta abordagem, do mesmo modo que o método ZERI prevê o metabolismo tecnológico, no qual os resíduos de um processo devem servir de matéria prima para outro, como em um ciclo da natureza (McDONOUGH e BRAUNGART, 2002). A abordagem, que também atua como uma certificação de materiais e práticas relacionadas ao uso destes, com o propósito de gerar produtos do “berço ao berço” contrapondo o conceito do “berço ao túmulo” (MBDC, 2007). A abordagem traz a idéia de biomimetismo, na qual um resíduo é aproveitado ou metabolizado por outro reino, distinto do reino que é proveniente, a fim de ser valorizado (PAULI, 1996; PAULI, 1998; GUIMARÃES, 2006).

### **2.2.4 Engenharia verde**

A Engenharia Verde (EV) trata do desenvolvimento e comercialização de processos industriais que apresentam viabilidade econômica, ao passo que reduzem o risco para a saúde humana e para o meio ambiente. A EV cita doze diretrizes aos projetistas para alcançar o proposto (ANASTAS e ZIMMERMAN, 2003). As diretrizes apontadas pelos autores conduzem à eficiência no uso de materiais, pois propõem a minimização de geração de resíduos, além do reaproveitamento de recursos dentro dos processos. Para maiores detalhes pode-se consultar Anastas e Zimmerman (2003).

### **2.2.5 Química verde**

Química Verde (QV) refere-se à utilização de um conjunto de princípios com a finalidade de reduzir ou eliminar o uso e a geração de substâncias perigosas no projeto de produtos e processos químicos. Profissionais do setor químico sempre se esforçam para desenvolver processos e métodos eficientes, uma vez que eficiência é importante tanto para medir a qualidade de um processo de transformação da matéria-prima quanto para analisar a viabilidade técnica e econômica do mesmo. Considerações econômicas desempenham papel principal no projeto de processos, pois a seleção de matérias-primas está de acordo com a maior disponibilidade ou o menor custo (ANASTAS e WARNER, 1998). Para maiores detalhes pode-se consultar Anastas e Warner (1998).

### **2.2.6 Ecodesign/ Design for Environment**

O conceito de Ecodesign teve sua origem no trabalho de Victor Papanek, originalmente publicado em 1971. O Eco-Design e o Design for Environment (DfE) são conceitos muito próximos que neste artigo serão tratados como sinônimos, sendo que este último pertence a uma família de diretrizes de projeto conhecida como Design for X (DfX). O Ecodesign propõe o desenvolvimento de produtos a fim de minimizar a utilização de recursos naturais, a geração de resíduos, os riscos à segurança, à saúde e a degradação ecológica (FIKSEL, 1996; LUTTROP E LAGERSTEDT, 2006; VEZZOLI e MANZINI, 2008). Além disso, são destacados caráter de fabricação dos produtos que facilitem a montagem e desmontagem dos produtos e possíveis adaptações (BACK et al., 2008). Segundo Guimarães (2006) a aplicação das práticas de DfE e Ecodesign nas indústrias estão voltadas para incrementos e melhorias de produtos e processos existentes para que através de ganhos na qualidade ambiental, estas melhorem sua competitividade no mercado.

### **2.2.7 Produção Limpa**

O conceito Produção Limpa (PL) foi proposto pela organização ambientalista não-governamental Greenpeace, em 1990, para representar o sistema de produção industrial que considerasse a auto-sustentabilidade. A PL é um sistema de produção que se destina a eliminar os resíduos tóxicos e insumos e, finalmente, promove o uso criterioso de energia e materiais renováveis (GREENPEACE, 1997; CLEAN PRODUCTION ACTION, 2010). De acordo com estudos realizados por Thorpe (1999), a PL é baseada numa visão circular da economia.

### **2.2.8 Produção Mais Limpa**

Segundo a UNIDO (United Nations Industrial Development Organization) (1989) e UNEP (United Nations Environmental Program) (1989), Produção mais Limpa (P+L) é a aplicação contínua de uma estratégia ambiental preventiva integrada aos processos, produtos e serviços, a fim de aumentar a eco-eficiência e reduzir os riscos para os seres humanos e para o meio ambiente. A abordagem propõe a economia de energia e matérias-primas, minimização ou reciclagem dos resíduos gerados, e controle de poluição e ainda ganhos relacionados à melhoria de trabalho dos envolvidos, que são fatores que contribuem para a melhor performance ambiental e econômica para os processos produtivos, mesmo que tais fatores mereçam esforços conjuntos ( desde a alta administração até setor de produção) para serem



alcançados. Aplica-se a processos produtivos, a produtos e a serviços (WBCSD, 1996; GUNNINGHAM e SINCLAIR, 1997; CNTL, 2003; SOUZA et al., 2008).

As diretrizes da P+L estão voltadas para redução ou substituição de materiais tóxicos no processo produtivo ou uso do produto, reciclagem de materiais dentro dos processos, projeto de produtos que sejam fáceis de desmontar para promover o reuso e a reciclagem e meios mais eficientes de uso de recursos e energia nos processos, onde as considerações ambientais formam o componente central dos processos de decisão (WBCSD, 1996).

### **3. MÉTODO**

Este artigo traz uma pesquisa bibliográfica, com abordagem qualitativa. Neste estudo fez-se uma revisão em diversas fontes sobre as abordagens que tratam de sustentabilidade para posterior avaliação dos processos industriais de polpeamento de celulose. O método de trabalho do artigo foi realizado a partir de seis etapas descritas a seguir:

*i)* Levantamento bibliográfico de processos de polpeamento e das abordagens sobre sustentabilidade

Para o levantamento das informações, foram consultadas as seguintes bases de dados: Google Livros ([books.google.com.br](http://books.google.com.br)), Google Acadêmico ([scholar.google.com.br](http://scholar.google.com.br)), Scielo ([scielo.br](http://scielo.br)) e Science Direct ([sciencedirect.com](http://sciencedirect.com)).

*ii)* Análise dos textos bibliográficos

Os textos das abordagens foram compilados e analisados com respeito à existência de diretrizes norteadoras da melhoria dos processos produtivos. As diretrizes foram catalogadas por abordagem/fonte.

*iii)* Definição de critérios para avaliação dos processos de polpeamento de celulose

O conjunto de diretrizes gerado na fase anterior foi reorganizado e as redundâncias eliminadas, gerando uma lista de diretrizes única. Estas diretrizes foram convertidas em critérios para avaliação dos processos de polpeamento de celulose e compiladas em quadro, no qual cada critério está associado às abordagens de origem e autores. Os critérios definidos para análise dos processos foram avaliados e agrupados em três categorias: critérios de seleção de recursos materiais e energéticos; preparação da produção e adequação de processos; gestão do fim de vida.

*iv)* Elaboração de instrumento de análise dos métodos de polpeamento de celulose



Os critérios definidos para análise dos processos de polpeamento de celulose foram submetidos a avaliação. O instrumento elaborado contempla os blocos de critérios, uma escala de dois níveis para avaliação subjetiva de cada critério (atende, não atende) e um espaço para comentários do avaliador caso o critério não fosse atendido. O instrumento também contém um campo para o avaliador indicar o grau de conhecimento que tem a respeito do processo de polpeamento analisado e instruções de preenchimento, uma vez que o espaço de análise compreende apenas as operações relacionadas à etapa de polpeamento, bem como a preparação do licor de cozimento e recursos energéticos usados.

v) Análise dos processos de polpeamento de celulose

A partir do material bibliográfico sobre os processos de polpeamento de celulose, apresentado no item *i* do método, foi possível analisar cada processo frente aos critérios propostos no instrumento de análise do item *iv*. Após avaliação do próprio pesquisador, especialistas definidos por conveniência, realizaram análise dos processos frente aos critérios, para confirmar os resultados obtidos com a análise realizada previamente a partir de informações da literatura. Foram questionados três profissionais: um deles ocupa posição de gerente de tecnologia de unidade gaúcha de empresa brasileira líder mundial de produção de celulose branqueada de eucalipto que utiliza processo alcalino; outro é gerente de produção da única empresa brasileira que utiliza processo ácido nas suas operações; e o terceiro é importante consultor do setor de papel e celulose, com formação na área.

vi) análise dos processos de polpeamento de celulose e seleção do método

A partir da análise dos processos, aquele que fosse mais flexível às matérias-primas usadas para polpeamento de celulose e ainda atendesse aos critérios propostos gerando polpas favoráveis a diferentes aplicações, foi o selecionado.

#### **4. RESULTADOS**

Os resultados apresentados neste artigo estão baseados no método de trabalho proposto. O levantamento bibliográfico contemplou duas etapas: materiais bibliográficos a respeito das características dos processos de polpeamento de celulose Kraft, Soda e Sulfito Ácido; e diretrizes para melhoria da sustentabilidade de processos. Foram selecionadas as diretrizes aplicáveis a processos segundo as abordagens pesquisadas no levantamento bibliográfico e elas foram arranjadas conforme abordagem e fonte, como mostrado no Quadro 1.

Quadro 1: Relação de diretrizes para processos originadas das abordagens de sustentabilidade e seus autores de referência

<b>Aspecto da sustentabilidade</b>	<b>Diretrizes</b>	<b>Abordagens</b>	<b>Autor/Organização</b>
<b>E</b>	<b>Usar matérias-primas mais viáveis economicamente</b>	Cadeia de Suprimentos Verde, Ecodesign, Química Verde e Produção mais Limpa	9, 20, 19
<b>A</b>	<b>Usar matérias-primas de fontes renováveis</b>	Produção Limpa, Química Verde e Engenharia Verde, Ecodesign	11, 6, 5, 21, 8, 19
<b>A e E</b>	<b>Capacidade de usar menor quantidade de energia (uso eficiente)</b>	Produção Limpa, Produção mais Limpa, Química Verde, Engenharia Verde, Ecodesign e ZERI	11, 6, 5, 21, 12, 4, 1, 13, 2
<b>A</b>	<b>Usar o mínimo de materiais diferentes</b>	Produção Limpa, Engenharia Verde e Ecodesign	11, 21, 5, 19
<b>A</b>	<b>Reduzir ou eliminar o uso de substâncias tóxicas (teratogênicas, carcinogênicas, etc.)</b>	Cadeia de Suprimentos Verde, Berço ao Berço, ZERI, Produção Limpa, Produção mais Limpa, Engenharia Verde, Química Verde e Ecodesign	13, 17, 9, 10, 16, 6, 11, 5, 8, 4, 1, 19, 2, 7, 3
<b>A</b>	<b>Escolher reagentes catalíticos, tão seletivos quanto possível</b>	Química Verde	6
<b>A</b>	<b>Escolher matérias-primas que sejam biodegradáveis</b>	Química Verde	6
<b>A</b>	<b>Escolher ou substituir matérias primas capazes de não gerar</b>	Cadeia de Suprimentos Verde, Berço ao Berço, ZERI, Produção Limpa,	3, 7, 14, 17, 9, 10, 16, 11, 6, 5, 21, 8, 2, 18, 1, 13, 19, 2

	<b>resíduos e/ou emissões tóxicas</b>	Produção mais Limpa, Engenharia Verde, Química Verde e Ecodesign	
<b>A</b>	<b>Escolher substâncias inerentemente mais seguras quanto à prevenção de acidentes químicos (explosões, incêndios, fugas, etc.)</b>	Química Verde	6
<b>A</b>	<b>Minimizar o uso de substâncias auxiliares nas reações químicas, ou usar apenas aquelas não nocivas</b>	Química Verde	6
<b>A</b>	<b>Gerenciar o final de vida do produto</b>	Engenharia Verde, Berço ao Berço e Produção Limpa, Ecodesign	10, 11, 5, 28, 19
<b>E</b>	<b>Prover a máxima integração das matérias-primas no produto final – eficiência</b>	Química Verde	6
<b>A e E</b>	<b>Evitar etapas adicionais nos processos, evitando assim, o uso adicional de reagentes químicos</b>	Química Verde, Ecodesign	6, 19
<b>A</b>	<b>Projetar produtos com maior vida útil</b>	Produção Limpa, Berço ao Berço, Engenharia Verde e Ecodesign	10, 11, 5, 13, 19
<b>A</b>	<b>Monitorar os processos de fabricação em tempo real a fim de se controlar previamente a formação de substâncias nocivas</b>	Química Verde e Berço ao Berço	10, 6

<b>E</b>	<b>Prover maior eficiência em tempo e espaço para a realização dos processos</b>	Engenharia Verde	11
<b>E</b>	<b>Projetar operações de separação e purificação com a minimização de recursos energéticos e de matéria-prima</b>	Engenharia Verde	11
<b>A</b>	<b>Capacidade de propiciar melhorias no produto</b>	Berço ao Berço, ZERI e Ecodesign	3, 7, 15, 13
<b>A</b>	<b>Usar energia oriunda de recursos renováveis</b>	Produção Limpa, Engenharia Verde e Química Verde, Ecodesign	11, 6, 8, 19
<b>A e E</b>	<b>Reusar energia dentro do processo</b>	Produção Limpa, Berço ao Berço, ZERI, Produção mais Limpa e Engenharia Verde	3, 7, 11, 5, 21, 8
<b>E</b>	<b>Diminuir consumo de energia durante a produção do produto</b>	Produção Limpa, Produção mais Limpa, Engenharia Verde, Química Verde e Ecodesign	11, 6 21
<b>A e E</b>	<b>Minimizar o fluxo de resíduos gerados no processo produtivo</b>	Cadeia de Suprimentos Verde, Produção mais Limpa, Engenharia Verde, Química Verde e Ecodesign	6, 8, 4, 12, 1, 19, 2
<b>A e E</b>	<b>Reciclar ou reusar materiais dentro ou fora do processo, agregando valor aos mesmos</b>	Cadeia de Suprimentos Verde, Berço ao Berço, ZERI, Produção Limpa, Produção mais Limpa, Engenharia Verde e	3, 7, 15, 10, 11, 5, 8, 4, 13, 18, 19, 2

		Ecodesign	
<b>A</b>	<b>Reduzir ou eliminar a presença de resíduos e/ou emissões tóxicas</b>	Cadeia de Suprimentos Verde, Berço ao Berço, ZERI, Produção Limpa, Produção mais Limpa, Engenharia Verde, Química Verde e Ecodesign	14, 11, 6, 5, 8, 4, 12, 18, 1, 13, 19, 2
<b>A e E</b>	<b>Capacidade de reprocessar resíduos a fim de agregar valor aos mesmos (reciclar ou reusar)</b>	Berço ao Berço, Produção mais Limpa, Ecodesign e ZERI	11, 4, 20, 18, 19

Legenda: Ambiental (A); Econômico (E). Número de referência: (1) Fiksel (1996); (2) WBCSD (1996); (3) Pauli (1996); (4) Gunningham e Sinclair (1997); (5) Greenpeace (1997); (6) Anastas e Warner (1998); (7) Pauli (1998); (8) Thorpe (1999); (9) EPA (2000); (10) McDonough e Braungart (2002); (11) Anastas e Zimmerman (2003); (12) CNTL (2003); (13) Luttrupp e Lagerstedt (2006); (14) Vachon e Klassen (2006); (15) Guimarães (2006); (16) MBDC (2007); (17) Srivastara (2007); (18) Vezzoli e Manzini (2008); (19) Back et al. (2008); (20) Souza et al. (2008); (21) Clean Production Action (2010)

Os aspectos econômicos seriam considerados em vista da capacidade de reuso ou máxima eficiência no uso de recursos materiais e energéticos, os quais permitiriam redução de custos no processo. O conjunto de diretrizes geradas foi reorganizado a fim de eliminar redundâncias e propor uma lista única de diretrizes para processos que tenham os aspectos econômicos e ambientais alinhados com a sustentabilidade. Tais diretrizes foram convertidas em critérios de avaliação dos processos, os quais se subdividiram em três subgrupos de polpeamento de celulose. Os critérios originados das diretrizes estão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2: Relação dos critérios originados das diretrizes

<b>Critérios</b>	
<b>Seleção de recursos materiais e energéticos</b>	Usar matérias-primas economicamente mais viáveis
	Usar matérias-primas de fontes renováveis
	Usar o mínimo de materiais diferentes
	Reduzir ou eliminar o uso de substâncias tóxicas (teratogênicas, carcinogênicas, etc)

	Escolher reagentes catalíticos, tão seletivos quanto possível
	Escolher matérias-primas biodegradáveis
	Escolher ou substituir matérias primas capazes de não gerar resíduos e/ou emissões tóxicas
	Escolher substâncias inerentemente mais seguras quanto a prevenção de acidentes químicos (explosões, incêndios, fugas, etc)
	Minimizar o uso de substâncias auxiliares nas reações químicas, ou usar apenas as não nocivas
	Usar energia oriunda de recursos renováveis
<b>Preparação da produção e adequação dos processos, considerando o controle de resíduos e emissões</b>	Capacidade de usar menor quantidade de matéria-prima (uso eficiente)
	Prover a máxima integração das matérias-primas no produto final - eficiência
	Monitorar os processos de fabricação em tempo real a fim de se controlar previamente a formação de substâncias nocivas
	Prover maior eficiência em tempo e espaço para a realização dos processos
	Projetar operações de separação e purificação com a minimização de recursos energéticos e de matéria-prima
	Reusar energia dentro do processo
	Diminuir consumo de energia durante a produção do produto
	Minimizar o fluxo de resíduos gerados no processo produtivo
	Reduzir ou eliminar a presença de resíduos e/ou emissões tóxicas
Evitar etapas adicionais nos processos, evitando assim, o uso adicional de reagentes químicos	
<b>Gestão fim de vida</b>	Projetar produtos com maior vida útil
	Reciclar ou reusar materiais dentro ou fora do processo, agregando valor aos mesmos
	Gerenciar o final de vida do produto

Os critérios definidos para avaliação dos processos foram colocados em um instrumento de análise a fim de questionar profissionais do meio quanto ao atendimento ou não destes nos processos de polpeamento de celulose. A pesquisadora também aplicou o instrumento para a análise dos processos de polpeamento de celulose Kraft, Soda e Sulfito Ácido, com base nas informações da literatura. Além da avaliação dos processos frente aos critérios, estes foram avaliados quanto à flexibilidade em se usar diferentes tipos de materiais vegetais.

Posteriormente, ao recebimento das respostas comentadas após a aplicação do instrumento e estudo e entendimento dos processos feito pela pesquisadora, foi possível a análise dos processos empregados. As questões foram dispostas no Quadro 3, sendo que os itens marcados como não avaliados pelos profissionais do meio são comentados no texto. Neste quadro encontra-se o resumo da análise realizada pelos entrevistados e pela pesquisadora.

Quadro 3: Análise dos processos de polpeamento de celulose frente a aspectos econômicos e ambientais da sustentabilidade sob ponto de vista dos entrevistados e pesquisadora



Critérios / Processos		Sulfito		Kraft		Soda	
		Atende	Não atende	Atende	Não atende	Atende	Não atende
Seleção de recursos materiais e energéticos	Usar matérias-primas mais viáveis economicamente	x		x		x	
	Usar matérias-primas de fontes renováveis	x		x		x	
	Usar o mínimo de materiais diferentes	x		x		x	
	Reduzir ou eliminar o uso de substâncias tóxicas (teratogênicas, carcinogênicas, etc)	x		x		x	
	Escolher reagentes catalíticos, tão seletivos quanto possível		x	x			x
	Escolher matérias-primas que sejam biodegradáveis	x		x		x	
	Escolher ou substituir matérias primas capazes de não gerar resíduos e/ou emissões tóxicas	x			x	x	
	Escolher substâncias inerentemente mais seguras quanto a prevenção de acidentes químicos (explosões, incêndios, fugas, etc)	x		x		x	
	Minimizar o uso de substâncias auxiliares nas reações químicas, ou usar apenas aquelas não nocivas		x	x		x	
	Usar energia oriunda de recursos renováveis	x		x		x	
Preparação da produção e adequação dos processos, considerando o controle de resíduos e emissões	Capacidade de usar menor quantidade de matéria-prima (uso eficiente)	x		x		x	
	Prover a máxima integração das matérias-primas no produto final - eficiência	x		x		x	
	Monitorar os processos de fabricação em tempo real a fim de se controlar previamente a formação de substâncias nocivas	x		x		x	
	Prover maior eficiência em tempo e espaço para a realização dos processos	x		x		x	
	Projetar operações de separação e purificação com a minimização de recursos energéticos e de matéria-prima	x		x		x	
	Reusar energia dentro do processo	x		x		x	
	Diminuir consumo de energia durante a produção do produto	x		x		x	
	Minimizar o fluxo de resíduos gerados no processo produtivo	x		x		x	
	Reduzir ou eliminar a presença de resíduos e/ou emissões tóxicas		x		x	x	
	Evitar etapas adicionais nos processos, evitando assim, o uso adicional de reagentes químicos	x		x		x	
Gestão fim de vida	Projetar produtos com maior vida útil		x		x		x
	Reciclar ou reusar materiais dentro ou fora do processo, agregando valor aos mesmos	x		x		x	
	Gerenciar o final de vida do produto		x		x		x
Seleção do processo							
	Ser flexível ao uso de diferentes materiais vegetais		x	x		x	

Na avaliação completa do instrumento, apenas os itens referentes ao projeto de produtos com maior vida útil e gestão de fim-de-vida dos produtos foram avaliados como não atendidos. Especialista do setor alegou que “a fabricação de celulose tem seu ciclo de vida definido a partir de seu uso final, não sendo gerido pelas etapas de processo de extração”. No Quadro 3 estes itens são mostrados como não atendidos, gerando tais comentários e justificativas.

Durante a avaliação do processo Sulfito ácido, tanto por parte do estudo feito pela pesquisadora, quanto pela resposta do especialista verifica-se que não se faz uso de aditivos ou catalisadores de processos e que as soluções alcalinas são definidas conforme a maior eficiência e facilidade de recuperação dentro do processo. Ainda, do mesmo modo que ocorre nos processos alcalinos, as emissões gasosas são monitoradas sob padrões da legislação

vigente. Colaborando com os aspectos econômicos e ambientais dos processos, são empregadas tecnologias para lavagem dos gases e reincorporação dos mesmos no processo.

Durante a avaliação do processo ácido, os itens referentes ao projeto de produtos com maior vida útil e gestão de fim-de-vida dos produtos foram avaliados pelo especialista do processo ácido como não atendidos. De acordo com entrevistado *“o destino da aplicação da polpa celulósica e o fim-de-vida desta será definido, não ficando sob responsabilidade da indústria que opera o processo extrativo”*. Com base na literatura pesquisada e no entrevistado, as soluções alcalinas mais indicadas para uso no processo sulfito ácido foram  $\text{Ca (OH)}_2$  e Magnésio  $\text{Mg (OH)}_2$ . Segundo especialista, consultor de empresas do setor, *“quando há o uso de solução alcalina com Ca no licor de cozimento, o licor residual rico em Ca e lignossulfonados é vendido para aplicação em outros produtos de alto valor agregado. Só assim é viável o uso de Ca, pois os reagentes não podem ser recuperados no processo devido a problemas de incrustações”*. O estudo em material bibliográfico mostrou que entre os materiais constituintes do licor de cozimento estão: a lignina dissolvida, lignossulfonados, carboidratos degradados, sulfato de cálcio e de magnésio, extrativos, resinas, entre outros.

No caso de aplicação do processo bissulfito com solução de  $\text{Mg (OH)}_2$  é viável a recuperação deste pela queima em caldeira de recuperação do óxido de magnésio  $\text{MgO}$  e dióxido de enxofre  $\text{SO}_2$ , cuja recombinação permite formar o licor de cozimento. A pesquisa literária indicou que o uso de soluções alcalinas com Na ou  $\text{NH}_4^+$  é inviabilizado devido a dificuldades de recuperação dos reagentes e ao alto custo destes. Como relatado acima, as emissões atmosféricas de ambos processos são monitoradas via legislação vigente. Nos processo alcalino kraft, os compostos que são mais críticos ao controle são os compostos reduzidos de enxofre, enquanto nos processos ácidos, o controle mais rígido se volta ao gás sulfídrico  $\text{H}_2\text{S}$ .

O processo ácido foi avaliado segundo o profissional que trabalha em indústria que usa tal processo, sendo que os processos Soda e Kraft foram avaliados pelo profissional que atua em empresa que emprega processos alcalinos, devido ao seu amplo conhecimento. O consultor avaliou os itens de modo geral, argumentando que *“para analisar o uso de práticas sustentáveis de recuperação de reagentes e minimização de emissões, convém analisar o quanto a empresa está apta a dispor capitais e recursos em tecnologia”*. O consultor argumenta que os itens variam de acordo com as tecnologias adotadas pelas empresas.

Segundo resposta de especialistas e análise da pesquisadora, a avaliação do processo alcalino aplicado industrialmente com uso de aditivo indicou que a maior parte dos critérios mencionados são atendidos. Segundo especialista, gestor do setor de celulose, os critérios apresentados *“são itens de gestão do processo para atendimento das questões de sustentabilidade norteadoras da concepção de novos projetos industriais”*. As instalações industriais existentes visam à recuperação dos reagentes usados no licor de cozimento e demais compostos, assim como a recuperação da energia térmica. O estudo e o questionamento indicaram que *“as emissões atmosféricas são monitoradas de acordo com a legislação vigente, a fim de se enquadrarem dentro dos padrões exigidos”*. Estes padrões não são mostrados neste artigo, porém para maiores informações pode-se consultar a resolução número 38206 do CONAMA (CONAMA, 2010).

A pesquisa indica que o processo Soda não emprega enxofre no licor de cozimento, logo é menos seletivo que o Kraft no ataque a lignina, uma vez que apenas o NaOH é o agente deslignificante para o polpamento. Entretanto, segundo especialista questionado *“o processo soda tem menor uso de sulfeto de sódio, mas ainda assim contém o sal, que se forma a partir do acúmulo de enxofre dos combustíveis auxiliares nos ciclos de processo”*. Na opinião do especialista *“o processo Soda não apresenta diferenças significativas em termos de sustentabilidade em relação ao Kraft, pois o processo com uso de enxofre tem apresentado altos investimentos em tecnologias mais eficientes de recuperação e filtragem dos compostos odoríferos do enxofre”*. Todavia, ressalta-se que a viabilidade de ter sistemas de filtragem de gases eficazes depende do capital investido nas instalações industriais, portanto, ao utilizar o processo Soda livre de enxofre é garantida a não geração de compostos odoríferos de enxofre.

A pesquisa bibliográfica também indicou a maior flexibilidade quanto ao uso de diferentes matérias-primas para a polpamento de celulose por meio dos processos alcalinos. Estes ainda permitem o uso de aditivos de processo que auxiliam na seletividade das reações e preservação da celulose. Adicionalmente, os aspectos econômicos e ambientais da sustentabilidade são reforçados pelo fato do processo permitir o reaproveitamento do licor de cozimento tanto para formação de novo licor, quanto para a geração de energia. Além de que, é notável o uso energético eficiente. O processo ácido, por seu turno, também prevê eficiência energética, e polpas com alto grau de deslignificação, no entanto é restrito a escolha de materiais e reagentes.

Face ao exposto, constata-se o empenho do meio industrial na busca de tecnologia e seleção de reagentes para a adequação dos processos nos requisitos da sustentabilidade. O atendimento dos diversos critérios levantados mostra que o desempenho do setor vem crescendo para estar de acordo com as práticas sustentáveis. Um aspecto a ser ressaltado é de que as tecnologias para controle de emissão de gases, bem como recuperação de reagentes e energia dentro do processo estão cada vez mais elaboradas. Entretanto a incorporação destas novas tecnologias pelas indústrias do setor depende do capital investido pela indústria. A partir das informações coletadas e pesquisadas em diversas fontes bibliográficas e profissionais do meio, foi possível juntar as informações em um quadro resumo dos processos, a fim de selecionar o mais flexível aos diferentes materiais vegetais e alinhado aos aspectos sustentáveis abordados. Considerando os materiais pesquisados e especialistas questionados, a análise conduziu à escolha do processo Soda como o mais adequado para a aplicação em polpimento de celulose em diferentes fontes vegetais lignocelulósicas, ainda ele pode ter sua seletividade aprimorada com o uso de aditivos, não apresentando o inconveniente de geração de compostos odoríferos.

## **5. CONCLUSÃO**

A consideração de premissas de sustentabilidade em processos conduz a medidas para a redução do impacto ambiental e aumento de ganho econômico. O objetivo deste trabalho foi selecionar um processo de polpimento de celulose flexível ao uso de materiais vegetais de fonte não-madeira a partir da determinação de critérios econômicos e ambientais da sustentabilidade. Estes foram desenvolvidos com base no entendimento das abordagens que tratam de sustentabilidade.

As abordagens da sustentabilidade, com enfoque econômico e ambiental, listam práticas a fim de reduzir o impacto ambiental, como: controle de emissões, eficiência no uso de recursos materiais e energéticos e minimização ou reaproveitamento de resíduos. Alinhadas a tais diretrizes, as empresas vêm empenhando esforços para o atendimento de tais fatores. A análise dos processos de polpimento para seleção do mais adequado conduziu à escolha do processo Soda por atender a maior parte dos critérios de sustentabilidade definidos e ainda ser aplicável a diferentes fontes vegetais lignocelulósicas. Uma vez que o processo não usa compostos de enxofre no licor de polpimento, mas apenas NaOH, o uso de aditivos pode aprimorar a seletividade do processo, sem haver o inconveniente de geração de compostos odoríferos emitidos na atmosfera. Na seleção de processos e verificação do atendimento a

critérios sustentáveis, cabe ressaltar que muitas vezes as melhorias dependem da empresa dispor recursos financeiros para aplicar em seus projetos e processos com aquisição de tecnologias e materiais. Do mesmo modo, clientes aos quais se destinam os produtos devem estar cientes de práticas sustentáveis para que os resultados sejam otimizados. Oportunidades de melhorias podem estar no caminho da maior recuperação energética e controle de emissões, já que a recuperação de material dentro do processo já é bem representativa.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo fornecimento de bolsa de pesquisa.

## 7. REFERÊNCIAS

ANASTAS, P. T.; WARNER, J. C. **Green chemistry: theory and practice**. New York: Oxford University Press, 1998.

ANASTAS, P. T.; ZIMMERMAN, J. B. Design through the twelve principles of green engineering. **Environmental Science and Technology**, [s.l.], v.37, n.5, p. 94A-101A, 2003.

BACK, N. et al. **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem**. Barueri: Manole, 2008.

CLEAN PRODUCTION ACTION. Green Chemicals. Disponível em: <<http://www.cleanproduction.org/Home.php>>. Acesso em: 10 jun. 2010.

CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGIAS LIMPAS (CNTL). **Cinco fases da implantação de técnicas de produção mais limpa, série manuais de produção mais limpa**. Porto Alegre: SENAI-RS, 2003. Disponível em: <<http://www.senairs.org.br/cntl/>>. Acesso em: 24 dez. 2009.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res38206.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2010.

D'ALMEIDA, M. L. O. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2.ed. São Paulo: SENAI; IPT, 1988. v.1.

ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (EPA). **Profile of the pulp and paper industry: relatório**. Disponível em: <<http://www.cluin.org/download/toolkit/pulppasn.pdf>>. Acesso em: 08 maio 2010.

ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (EPA). **The lean and green supply chain: a practical guide for materials managers and supply chain managers to reduce cost and improve environmental performance**, 2000. Disponível em: <<http://www.epa.gov/oppt/library/pubs/archive/acct-archive/pubs/lean.pdf>>. Acesso em: 01 dez. 2009. Environmental Accounting Project.

FIKSEL, J. Achieving eco-efficiency through design for environment. **Environmental Quality Management**, New York, v.5, n.4, p. 47-54, 1996.

GREENPEACE. Greenpeace report. **O que é produção limpa?** 1997. Disponível em: <[www.greenpeace.org.br/toxicos/pdf/producao\\_limpa.doc](http://www.greenpeace.org.br/toxicos/pdf/producao_limpa.doc)>. Acesso em: 04 maio 2010.

GUIMARÃES, L. B. de M. Pela sustentabilidade de um design brasileiro. **Revista D: Design, Educação, Sociedade e Sustentabilidade**, Porto Alegre, n.1, p. 2006.

GUNNINGHAM, N.; SINCLAIR, D. **Barriers and motivators to the adoption of cleaner production practices**. Canberra: Australian National University, 1997.

HOLTON, H. H. Better cooking with anthraquinone. **Pulp and Paper International**, [s.l.], v.20, n.8, p. 49-52, 1977.

KAZAZIAN, T. **Haverá a idade das coisas leves: design e desenvolvimento sustentável**. Tradução Eric Roland Rene Heneault. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2005.

LINS, C.; OUCHI, H. C. **Sustentabilidade corporativa: papel e celulose**. Rio de Janeiro: Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 2007.

LINS, C.; ZYLBERSTAJN, D. **Sustentabilidade e geração de valor: a transição para o século XXI**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

LUTTROP, C.; LAGERSTEDT, J. Ecodesign and the ten golden rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v.14, n.15 – 16, p.1396 – 1408, 2006.

MANZINI, E. VEZZOLLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis: os requisitos ambientais dos produtos industriais**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002. 367 p.

MCDONOUGH BRAUNGART DESIGN CHEMISTRY (MBDC). **Cradle to cradle certification program**. Charlottesville: LCC, 2007. Disponível em: <[www.mbdc.com](http://www.mbdc.com)>. Acesso em: 19 out. 2010.

MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M.. DESIGN CHEMISTRY (MBDC). **Remaking the way we make things**: cradle to cradle. New York: North Point Press, 2002.

PAULI, G. **Emissão zero**: a busca de novos paradigmas: o que os negócios podem oferecer à sociedade. Tradução José W. M. Kaehler, Maria T. R. Rodriguez. Porto Alegre: EDIPUCRS, 1996.

PAULI, G. **Upsizing**: como gerar mais renda, criar mais postos de trabalho e eliminar a poluição. Porto Alegre: L&PM, 1998.

SIXTA, H. **Handobook of pulp**, v.1. Lenzing: Wiley-VCH, 2006.

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

SOUZA, A. H. C. B. et al. **Guia técnico ambiental da indústria de papel e celulose**. São Paulo: CETESB, 2008.

SRIVASTARA, S. K. Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review. **International Journal of Management Reviews**, [s.l.], v.9, p. 53-80, 2007.

THORPE, B. **Citizen's guide to clean production** . Lowell, MA: University of Massachusetts Lowell, 1999. Disponível em: <<http://sustainableproduction.org/downloads/C+Guide+Text.pdf>>. Acesso em: jun. 2010.

VACHON, S.; KLASSEN, R. D. Green project partnership in the supply chain: the case of the package printing industry. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v.14, n. 6-7, p. 661-671, 2006.

VEZZOLLI, C.; MANZINI, E. **Design for environmental sustainability**. Tradução Kristjan Pruul. London: Springer, 2008.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE (WBCSD). cleaner production and eco-efficiency - complementary approaches to sustainable development. In: UNEP's INTERNATIONAL HIGH LEVEL SEMINAR ON CLEANER PRODUCTION, 5., 1998, **Anais...** República da Coréia: WBCSD, 1998.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE (WBCSD). **Eco-efficiency and cleaner production**: charting the course to sustainability. New York: WBCSD, 1996.