



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE EMBALAGEM À BASE DE  
PAPEL PÓS-CONSUMO E COMPONENTES DE FONTE  
RENOVÁVEL

Daniel Cabral Ribeiro Ferro

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de  
Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, como  
parte dos requisitos necessários à obtenção do  
título de Engenheiro Metalúrgico.

Orientadora: Rossana Mara da Silva  
Moreira Thiré

Rio de Janeiro

Agosto de 2015

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE EMBALAGEM À BASE DE PAPEL  
PÓS-CONSUMO E COMPONENTES DE FONTE RENOVÁVEL

Daniel Cabral Ribeiro Ferro

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO  
DE ENGENHARIA METALÚRGICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
ENGENHEIRO DE MATERIAIS.

Examinado por:



Prof<sup>a</sup>. Rossana Mara da Silva Moreira Thiré, D.Sc.



Prof<sup>a</sup>. Renata Antoun Simão, D.Sc.



Prof<sup>a</sup>. Renata Nunes Oliveira, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO de 2015

Ferro, Daniel Cabral Ribeiro

Produção e caracterização de embalagem à base de papel pós-consumo e componentes de fonte renovável./ Daniel Cabral Ribeiro Ferro - Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2015.

X, 40 p.: il.; 29,7cm

Orientadora: Rossana Mara da Silva Moreira Thiré  
Projeto de Graduação – UFRJ/Escola Politécnica/  
Curso de Engenharia Metalúrgica, 2015.

Referencias Bibliográficas: p. 38-40

1.Papel pós-consumo 2.Aproveitamento de resíduos  
3.Embalagem 4.Teste de compressão 5.Teste de Archimedes. I.  
Thiré, Rossana Mara da Silva Moreira. II. Universidade Federal  
do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Metalúrgica. III.  
Produção e caracterização de embalagem à base de papel pós-  
consumo e componentes de fonte renovável.

Dedico este trabalho aos meus avós,  
Helena Pires da Silva e Inês Francisca Cabral da Silva.

## Agradecimentos

Aos meus pais, Edson e Daisy, e ao meu irmão, Rodrigo, por todo suporte, colaboração, esforço e contribuição para a minha formação, ao longo de todos esses anos nos quais sempre acreditaram no meu potencial.

Aos meus avós, Heleno e Inês, que são meu motivo de orgulho, inspiração e superação. Por todo apoio, carinho e amor transmitido ao longo da minha caminhada. Por me fazerem refletir e aprender com suas experiências de vida, sempre me incentivando e me tranquilizando com cada sorriso e abraço apertado.

À minha namorada, Karina Diniz, por estar sempre me ouvindo e me apoiando em todas as dificuldades e em todas as decisões. Por ser meu motivo de orgulho, amor e felicidade. A toda a sua família, por estar sempre ao meu lado, me mostrando o lado positivo das coisas, me aconselhando e me fazendo uma pessoa melhor.

Aos meus amigos, que levarei para sempre comigo, pela companhia e companheirismo durante essa longa jornada. Por todas as risadas, momentos de descontração, dificuldades e, acima de tudo, por fazerem parte da minha vida dentro e fora da faculdade.

À professora Rossana, minha orientadora, por toda a disponibilidade, paciência e contribuição para a realização desse trabalho. Por ter me orientado em diversas etapas da minha formação, desde a Iniciação Científica até o Projeto de Graduação.

À professora Giselle pelos conselhos e incentivos e a todos os professores da Metalmat, pelos conhecimentos transmitidos ao longo do curso, que sem dúvida contribuíram em muito para minha formação.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenharia Metalúrgica.

Produção e caracterização de embalagem à base de papel pós-consumo e componentes de fonte renovável

Daniel Cabral Ribeiro Ferro

Ago/2015

Orientador: Rossana Mara da Silva Moreira Thiré

Curso: Engenharia Metalúrgica

Devido a crescente preocupação ambiental relativa aos descartes de resíduos sólidos, no presente trabalho foi estudada a possibilidade de utilização de papel pós-consumo para fabricação de materiais que atuassem como substituto do poliestireno expandido (EPS) em determinadas aplicações, assim como embalagens. Foram produzidas composições com diferentes proporções de papel pós-consumo, amido de tapioca, óleo vegetal e carbonato de cálcio. As amostras foram caracterizadas quanto à densidade, volume de poros, porosidade e resistência à compressão. De acordo com os estudos apresentados, foi possível fabricar um protótipo de bandeja descartável, demonstrando uma possível aplicação na área de embalagens.

Palavras-chave: Papel pós-consumo, Aproveitamento de resíduos, Embalagem, Teste de compressão, Teste de Archimedes.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for degree of Metallurgical Engineer.

Production and characterization of packaging material made out of waste paper and renewable source components

Daniel Cabral Ribeiro Ferro

Aug/2015

Advisor: Rossana Mara da Silva Moreira Thiré

Course: Metallurgical Engineering

Environmental concerns related to the disposal of solid waste has motivated this study to the possibility of using waste paper for manufacturing materials that could substitute the expanded polystyrene (EPS) in certain applications, such as packaging. Different compositions were produced by adding tapioca starch, vegetable oil and calcium carbonate to the waste paper pulp. The samples were characterized for density, pore volume, porosity, and compression strength. According to our studies, it was possible to manufacture a prototype disposable tray, showing potential for application in the packaging area.

*Keywords:* Waste paper, Waste recovery, Packaging, Compression test, Archimedes test.

## ÍNDICE GERAL

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	OBJETIVO .....	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1	O papel .....	4
3.1.1	Celulose.....	4
3.1.2	Cargas .....	6
3.1.3	Agentes de colagem .....	7
3.1.4	Amido .....	7
3.1.5	Produtos químicos.....	8
3.1.6	Água e energia .....	8
3.2	Produção de papel .....	9
3.3	Resíduos da indústria do papel .....	10
3.4	Produção de papel reciclado .....	12
3.5	Exemplos de produtos obtidos utilizando papel .....	14
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	16
4.1	Materiais .....	16
4.1.1	Papel.....	16
4.1.2	Amido de tapioca .....	16
4.1.3	Óleo vegetal .....	16
4.1.4	Carbonato de cálcio.....	17
4.1.5	EPS.....	17
4.2	Fabricação da polpa .....	17
4.3	Fabricação dos aglomerados .....	18
4.4	Caracterização .....	20
4.4.1	Determinação da porosidade e da densidade aparente.....	20
4.4.2	Teste de Compressão .....	21
4.4.3	Microscopia Óptica .....	22
5	RESULTADOS .....	22
5.1	Avaliação geral das amostras.....	22
5.2	Efeito da variação da temperatura de secagem na estufa.....	24

5.3	Efeito do tempo de homogeneização .....	26
5.4	Efeito do teor de amido na composição .....	27
6	CONCLUSÕES .....	35
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	37
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	38

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1– Consumo de papel e aparas em milhões de toneladas. ....	1
Figura 2 - Constituintes da madeira e esquema de celulose do macro para o micro .....	5
Figura 3 – Estrutura da celulose.....	5
Figura 4 - Estrutura linear da celulose. As linhas pontilhadas esquematizam as ligações de hidrogênio possíveis.....	6
Figura 5 – Etapas da fabricação de papel.....	10
Figura 6 – Etapas da fabricação das amostras. Polpa colocada no modelador em posição invertida (a). Modelador posicionado em placa de Petri (b). Pressão aplicada até espessura desejada(c). Retirada do modelador, com amostra pronta para secagem (d). .	19
Figura 7 – Montagem do experimento para determinação da porosidade e densidade aparente. ....	20
Figura 8 – Amostras de diferentes colorações em função de suas composições e do papel utilizado na mistura.....	23
Figura 9 – Amostras do aglomerado 9.102 logo após o corte. ....	23
Figura 10 – Imagens das amostras da série 7 e série 9 em lupa.....	24
Figura 11 – Microscopia das amostras 9.1, 9.101 e 9.102 indicando a variação do teor de amido na composição.....	28
Figura 12 – 3 Regiões apresentadas a partir dos testes de compressão. ....	29
Figura 13 – Resultado geral do teste de compressão. ....	30
Figura 14 – Resultado do teste de compressão para a amostra de EPS. ....	31
Figura 15 – Microscopia de uma amostra de EPS .....	31
Figura 16 – Polpa úmida moldada em forma de EPS (a); Molde de EPS e bandeja pronta após secagem (b e c). ....	33
Figura 17 - Imagem obtida por microscopia óptica de luz polarizada da gota de amido de tapioca utilizada no presente trabalho.....	33

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Taxa de recuperação de diversos países em 2010. Taxa de recuperação corresponde ao volume de aparas recuperadas dividido pelo consumo aparente de papel. ....	2
Tabela 2: Variação da quantidade de componentes e do tempo de homogeneização ( $t_H$ ) utilizados para o preparo das amostras. ....	18
Tabela 3: Etapas de secagem utilizadas para o preparo das amostras. ....	19
Tabela 4: Variação de densidade, volume de poros e porosidade em relação à temperatura de secagem. ....	25
Tabela 5: Variação do volume em relação à temperatura de secagem. ....	25
Tabela 6: Variação de densidade, volume de poros e porosidade em relação ao tempo de homogeneização ( $t_H$ ). ....	26
Tabela 7: Variação do volume em relação ao tempo de homogeneização ( $t_H$ ). ....	26
Tabela 8: Variação de densidade, volume de poros e porosidade em relação ao teor de amido na composição. ....	27
Tabela 9: Variação do Módulo de Young em relação ao teor de amido na composição. ....	32
Tabela 10: Variação do volume em relação ao teor de amido na composição. ....	33

# 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um grande produtor de papel. Nos últimos dez anos, o país aumentou sua produção em 27,0%, com crescimento médio de 2,7% ao ano. O desenvolvimento socioeconômico e o aumento de renda da população, com a inserção de novos consumidores no mercado, resultaram em um aumento da demanda por livros, cadernos, jornais e revistas, embalagens para alimentos, remédios e itens de higiene pessoal (<http://bracelpa.org.br/bra2/?q=en/node/140>).

Em 2010, o setor posicionou-se como 10º produtor mundial de papel, produzindo mais de nove milhões de toneladas do produto (Figura 1).

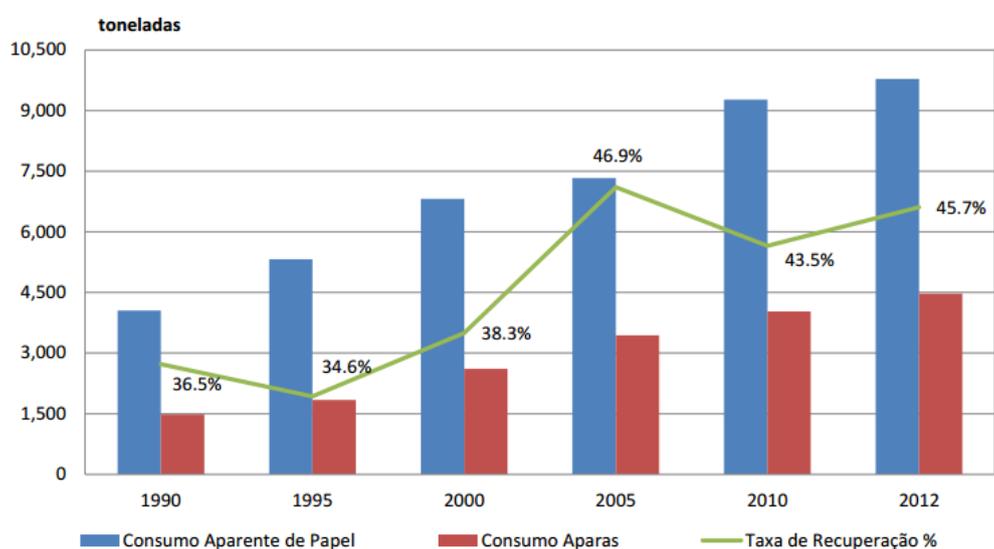


Figura 1– Consumo de papel e aparas em milhões de toneladas (Fonte: BRACELPA, 2014).

Dessa produção, apenas 45,5% do papel foi reciclado e convertido em novos produtos na cadeia de consumo. Pela Tabela 1, podemos perceber que estamos abaixo de muitos outros países na taxa de recuperação do papel, a exemplo da Coreia do Sul, que apresentou em 2010 aproximadamente o dobro da taxa de recuperação apresentada pelo Brasil.

Tabela 1: Taxa de recuperação de diversos países em 2010. Taxa de recuperação corresponde ao volume de aparas recuperadas dividido pelo consumo aparente de papel. Adaptado de BRACELPA (2014).

<b>Países selecionados</b>	<b>Taxa de Recuperação(%)</b>
Coréia do Sul	91,6
Alemanha	84,8
Japão	79,3
Reino Unido	78,7
Espanha	73,8
Estados Unidos	63,6
Itália	62,8
Indonésia	53,4
Finlândia	48,9
México	48,8
Argentina	45,8
Brasil	45,5
China	40,0
Rússia	36,4
Índia	25,9

Nos últimos anos a população mundial vem crescendo cada vez mais e devido à grande evolução na medicina, a expectativa de vida aumentou em relação aos anos anteriores. Por este e outros motivos, o consumo em geral vem aumentando e, conseqüentemente, a quantidade de lixo depositado no meio ambiente, existindo assim, a preocupação da sociedade e das empresas quanto à destinação correta de todo resíduo gerado (CHAGAS *et al.*, 2011).

Em 2012, a indústria brasileira gerou mais de 4.500 milhões de toneladas de resíduos de papel que não foram reciclados. Esse papel é espalhado pelas cidades em ruas, entupindo bueiros e esgotos, em rios, mares, lagos... O tempo de decomposição do papel em ambiente úmido é de aproximadamente 3 meses. Em local seco, o tempo é maior, e dependendo do tipo de papel considerado, sua decomposição pode se estender por muito mais tempo. É o exemplo dos jornais, que podem permanecer intactos por décadas.

Além do papel, poliestireno expandido - EPS (comercialmente conhecido como isopor®) é um exemplo de outro material que, ao ser descartado, torna-se ainda mais prejudicial ao meio ambiente.

O EPS é um material inerte quimicamente, não é biodegradável, não se desintegra, não desaparece no ambiente e não contém gás CFC. Com isso não contamina quimicamente o solo, a água ou o ar, mas constitui um problema ambiental se não reciclado, pois é um material considerado eterno e ocupa muito espaço devido a sua baixa densidade, causando problemas nos aterros sanitários municipais ou industriais (RAZZA *et al.*, 2015).

Em um estudo feito por CHAGAS *et al.* (2011) em uma indústria localizada no município de Barra Velha – SC, verificou-se que todo resíduo de EPS possuía como destino o aterro industrial após sua utilização nos processos produtivos, não sendo, portanto, reciclado ou reutilizado de nenhuma forma. A dificuldade em reciclar o EPS, aliado aos prejuízos causados pelo seu descarte, comprovam que esse material deve ser substituído principalmente em aplicações com tempo de vida útil curto, como por exemplo, em embalagens descartáveis.

## **2 OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho foi produzir e caracterizar composições à base de papel pós-consumo no intuito de se obter um material de baixo custo de produção com aplicação potencial na área de embalagens.

Foram produzidas amostras com diferentes temperaturas de secagem, tempos de homogeneização e teores de elementos adicionados a mistura, visando o aprimoramento das propriedades desejadas. Devido aos problemas ambientais relacionados ao descarte de produtos à base de poliestireno expandido (EPS), este material foi utilizado como controle ao longo do presente trabalho.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 O papel**

Antes da criação do papel, o produto usado para escrita eram os pergaminhos, oriundos de peles de animais. No ano de 105, na China, Ts' Ai Lun fabricou o papel, pela primeira vez, fragmentando, em uma tina com água, cascas de amoreira, pedaços de bambu, rami, redes de pescar, roupas usadas e cal para ajudar no desfibramento, e essa ideia continua válida até hoje (SANTOS *et al.*, 2001).

O papel é um dos materiais mais versáteis que conhecemos. Isso se deve a grande diversidade de processos e materiais empregados durante sua produção. Embora a principal matéria-prima para produção industrial do papel seja a madeira, alternativas também podem ser utilizadas, como, por exemplo, fibras de bambu, juta e sisal, bagaço de cana, entre outros. O papel também pode ser obtido a partir da reciclagem. As principais matérias primas usadas na produção do papel estão descritas a seguir.

##### **3.1.1 Celulose**

Na produção tradicional do papel, a madeira é a principal fonte de celulose utilizada. A composição natural da madeira é de 50% água e a fração sólida é composta por aproximadamente 45% de celulose, 25% de hemicelulose, 25% de lignina e os 5% restantes são materiais orgânicos e inorgânicos (EUROPEAN COMMISSION, 2001). A Figura 2 ilustra os constituintes das madeiras, e a celulose em diferentes proporções.

A obtenção de celulose, a partir dos mais diversos tipos de matrizes lignocelulósicas, envolve uma série de processos que objetivam a separação da celulose dos outros componentes naturais. O processo Kraft (polpação) é um dos mais utilizados atualmente, solubilizando a lignina e dando origem a polpa celulósica. Após sua obtenção, as fibras de celulose, virgens (oriundas da biomassa vegetal) ou recicladas, são incorporadas ao processo de fabricação do papel para dar origem ao produto final (BAPTISTA *et al.*, 2008).

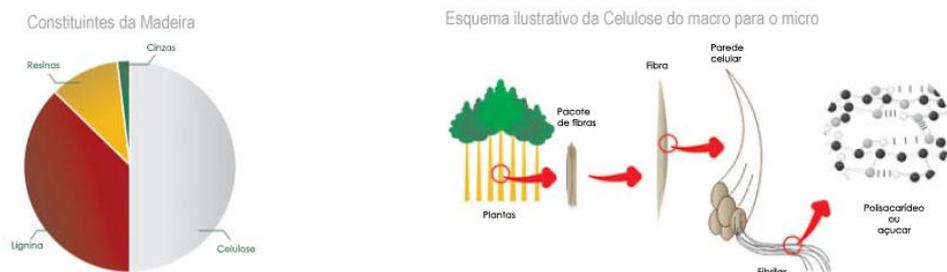


Figura 2 - Constituintes da madeira e esquema de celulose do macro para o micro (<http://www.celuloseriogradense.com.br/produtos>)

A celulose é o polímero natural mais abundante na Terra, sendo o componente presente em maior percentagem na biomassa das plantas. Devido ao seu formato alongado e de pequeno diâmetro, é frequentemente categorizada como fibra. A celulose é um polissacarídeo linear, constituído por um único tipo de unidade de açúcar, e é formada por unidades de monossacarídeos  $\beta$ -D-glicose, que se ligam entre si através dos carbonos 1 e 4, originando um polímero linear. A Figura 3 mostra a estrutura da celulose. (KLEMM *et al.*, 1998).

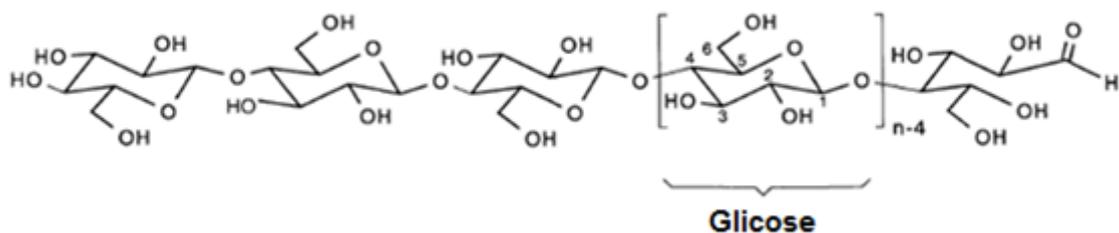


Figura 3 – Estrutura da celulose

A molécula de celulose é composta por duas regiões, sendo uma amorfa e outra cristalina. A região amorfa tem estrutura flexível e é responsável pela absorção de água e inchamento da molécula. Já a região cristalina tem configuração ordenada, sendo rígida e flexível, impedindo o inchamento nessas áreas e mantendo a integridade estrutural da molécula. A forte rede de ligações de hidrogênio é responsável por tais

características (CASTRO, 2009). Essas ligações podem ser intramoleculares, entre grupos hidroxila da mesma molécula, responsáveis pela rigidez da cadeia, ou intermoleculares, entre grupos hidroxilas de cadeias adjacentes, sendo responsáveis pela formação da fibra vegetal (BARUD, 2006). A Figura 4 evidencia a estrutura linear da celulose e as possíveis ligações de hidrogênio existentes na cadeia.

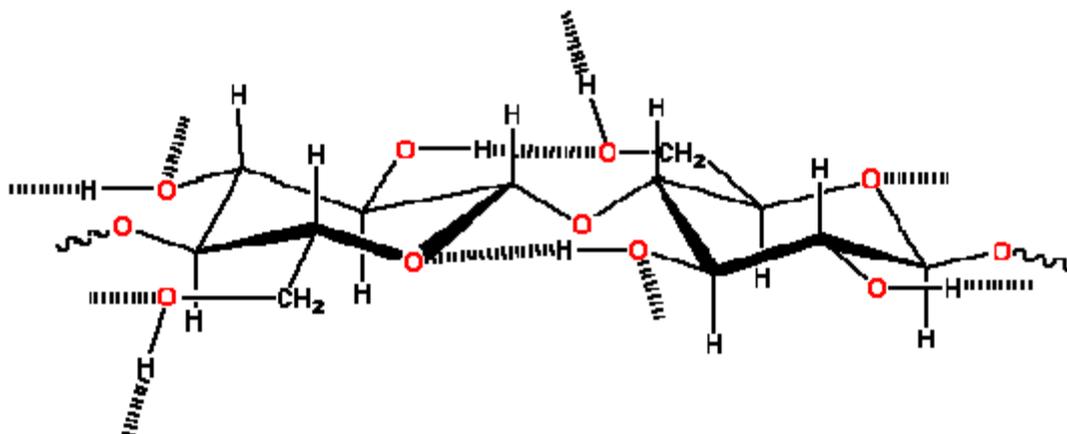


Figura 4 - Estrutura linear da celulose. As linhas pontilhadas esquematizam as ligações de hidrogênio possíveis (DONINI *et al.*, 2010).

### 3.1.2 Cargas

As cargas são adicionadas ao processo produtivo visando conferir propriedades específicas ao produto final. Em papéis de impressão e escrita, as cargas são responsáveis pelo aumento da opacidade e melhoria do acabamento superficial, conferindo lisura e satisfatória capacidade de impressão.

Entre as cargas mais utilizadas podemos destacar o talco, caulim, dióxido de titânio e o carbonato de cálcio.

O carbonato de cálcio, assim como outros elementos como caulim e o talco, é frequentemente utilizado na produção do papel, além de ser um mineral que tem diversas aplicações industriais. Na indústria do papel, ele pode ser usado quando o processo de polpação é alcalino. A presença do carbonato de cálcio melhora as propriedades óticas do papel, aumentando o brilho do produto final. Além disso, proporciona melhor capacidade de impressão, diminui a tendência do papel a amarelar,

aumenta a durabilidade da folha, diminui os custos da produção (substituição de fibras) e melhora a estabilidade dimensional (PETER PANG *et al.*, 1998; GAUDREAU *et al.*, 2015).

### **3.1.3 Agentes de colagem**

Vários tipos de papel necessitam ter resistência controlada à penetração de líquidos, em especial à água. Para isto, é adicionado ao papel produtos que a repelem. Existem dois tipos de colagem feita nas massas, ácida e alcalina:

Na colagem ácida, o material empregado é a cola de resina. Derivada do breu, a resina é precipitada em pH ácido (devido a adição de sulfato de alumínio), se depositando sobre as fibras de celulose na forma de resinato de alumínio.

Na colagem alcalina, utiliza-se um composto químico denominado alquilceteno, que reage com a celulose ([www.tecnicalpa.com/files/CelulosePapel.doc](http://www.tecnicalpa.com/files/CelulosePapel.doc)).

### **3.1.4 Amido**

O amido é a terceira matéria prima mais utilizada na fabricação do papel, ficando atrás apenas das fibras de celulose e dos minerais. Dependendo do tipo de papel produzido, a percentagem de amido pode chegar até 10% do peso do produto final, e diferentes tipos de amidos podem ser empregados. Os mais comuns usados para fabricação de papel são os de milho, batata e mandioca e eles geralmente são modificados para proporcionar aumento em certas propriedades para cada aplicação.

Amidos modificados catiônicos são geralmente utilizados no final do processo de polpação. Seu uso serve para aumentar a resistência das ligações fibras-fibras e fibras-minerais. Como o amido é carregado positivamente, ele é atraído pela carga negativa das fibras de celulose e pelas cargas negativas das cargas minerais, ligando-as entre si.

Amidos oxidados podem ser utilizados no processo de colagem superficial, melhorando as propriedades superficiais do papel e proporcionando melhor capacidade

de impressão e escrita. Esse tipo de amido é preferível ao amido não modificado devido sua boa característica de formação de filme e maior estabilidade.

Além disso, a adição de amido também pode ser vista na operação de revestimento superficial. O amido, neste caso hidroxietílico, age como um adesivo de ligação das partículas de pigmento e dessas com a superfície do papel. Para que essa ligação seja suficientemente forte, os amidos utilizados nessa fase devem ser adicionados em grande quantidade, e para isso devem apresentar baixa viscosidade (SANGSEETHONG *et al.*, 2009).

### **3.1.5 Produtos químicos**

Uma variedade de produtos químicos, incluindo sulfato de sódio, hidróxido de sódio (soda cáustica), clorato de sódio, cloro e peróxido de hidrogênio e oxigênio, é utilizada no processo de produção de papel, sobretudo na etapa da produção da celulose.

### **3.1.6 Água e energia**

A água é utilizada para dissolver as matérias-primas, aditivos e químicos utilizados na produção de papel, transportando-os das fabricas para a máquina de papel. A água é também utilizada para objetivos de arrefecimento ou sanitários.

A água doce necessita ser constantemente reduzida durante um longo período devido a razões de eficiência energética e a uma utilização mais cuidadosa. As águas residuais são tratadas em três passos; mecânico, biológico e químico.

A utilização de energia é baseada em biocombustíveis e é primeiramente uma combinação de produção de eletricidade e calor. A mistura de fontes de energia varia de acordo com a localização das fábricas e dos produtos manufaturados. A eletricidade é especialmente usada para produzir celulose mecânica e acionar motores/bombas. (<http://www.na.sappi.com/eQ/files/infographics/water.pdf>).

## 3.2 Produção de papel

A primeira etapa da fabricação de papel é dada pela coleta de troncos de árvores nas áreas de reflorestamento. As toras de madeira são cortadas em tamanhos apropriados e tem seus galhos removidos antes de serem transportadas para a fábrica.

Ao chegar à fábrica, a madeira é descascada e suas cascas podem ser queimadas para geração de energia dentro da própria instalação industrial. As toras são então picotadas na forma de cavacos, indo para a etapa de polpação. (SANTOS *et al.*, 2001). O processo de polpação tem como objetivo principal obter a pasta celulósica.

O processo de polpação pode ser realizado por meio de um processo químico (com pH neutro, ácido ou básico), no qual a maior parte da lignina é removida, por processos mecânicos, no qual a maior parte da madeira é aproveitada (polpações de alto rendimento), por processos físicos e biotecnológicos. A lignina é o componente responsável pela resistência estrutural da madeira, e ela pode ser considerada uma barreira física para a produção de papel, pois torna as fibras cimentadas entre si.

O método de polpação mais utilizado no Brasil é o processo Kraft. Nele, os cavacos são submetidos à reação química através de uma solução contendo hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na<sub>2</sub>S) dentro de um equipamento chamado digestor. Nele, altas pressões e temperaturas fazem com que os produtos químicos entrem em contato com a lignina, fragmentando-a e solubilizando-a na solução alcalina. Através de processos de lavagem, a lignina solubilizada é removida das fibras. A mistura aquosa formada recebe o nome de licor escuro e retorna para o ciclo após a queima da lignina para geração de energia e da recuperação, purificação e reconstituição dos componentes químicos (licor branco) (GIBBONS, 1989).

Devido sua coloração escura, a pasta de celulose obtida após a polpação passa por outro processo químico, de branqueamento. Nele, a lignina residual que não foi retirada dos processos anteriores é finalmente removida. A remoção da lignina é necessária não só para obter uma celulose pura, mas também para dar um aspecto de alvura elevado, característica fundamental para proporcionar alta qualidade ao produto final.

Dependendo da aplicação final do produto, vários aditivos são incorporados à fabricação, como por exemplo, colas, cargas minerais, corantes, pigmentos, água e demais elementos. Além disso, fibras recicladas obtidas de papéis pós-consumo podem ser empregadas.

Após a etapa de branqueamento da polpa, ela é lançada em telas formadoras que, aliadas a um sistema a vácuo, retira a maior parte da água formando assim uma folha de papel. Essa folha é então prensada para remoção da umidade final e passa por um processo de secagem, com cilindros aquecidos a vapor. O papel é enrolado em grandes bobinas, seguindo então para acabamento final, embalagem e destinação ao mercado consumidor. (SANTOS *et al.*, 2001).

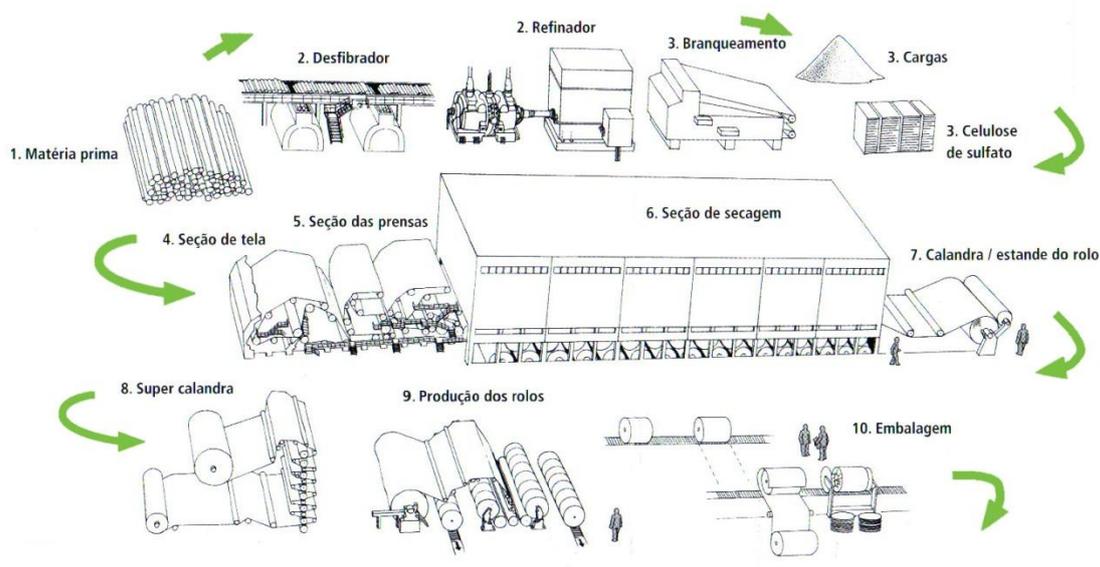


Figura 5 – Etapas da fabricação de papel. Retirado de:

<http://projetointerdisciplinar1b.blogspot.com.br/2012/10/historia-do-papel.html>.

### 3.3 Resíduos da indústria do papel

Define-se como resíduo de indústrias de base florestal as sobras dos processamentos mecânico, físico ou químico que não são incorporadas ao produto final. O processo de produção de papel e celulose geram resíduos com alto percentual de matéria orgânica

oriundos da madeira, e são considerados pela legislação brasileira como não perigosos (classe III). (ROSELANE, 2008)

No caso da obtenção da celulose, a casca, a lama de cal, o lodo e a cinza resultante da queima de biomassa são classificados como resíduos. Nas fábricas de papel e celulose, a quantidade de resíduos chega até 32% da produção. A opção de envio desses resíduos para aterros sanitários se torna inviável devido ao custo, além dos cuidados especiais de manuseio para evitar contaminações ambientais. A maior parte das unidades possui hoje aterros controlados para deposição segura dos resíduos, com mecanismos para separação, reciclagem e reutilização dos mesmos. (CELPA, 2004)

Os resíduos orgânicos gerados pela indústria do papel podem ter efeitos benéficos para os solos, elevando o pH (aumentando a disponibilidade de determinados nutrientes), aumentando a capacidade de troca catiônica dos solos, incorporando nutrientes minerais às árvores e melhorando a densidade do solo e sua capacidade de retenção de água. Essas correções são necessárias para melhorar a fertilidade e o nível de matéria orgânica nos solos, beneficiando muitas vezes solos utilizados para reflorestamento, que em geral possuem baixa fertilidade.

Os resíduos que não passíveis de reaproveitamento vão para o aterro industrial. Apesar dos resíduos sólidos não serem consideradas tóxicos, o acúmulo dos mesmos torna-se problemático. Já os resíduos líquidos e gasosos são altamente tóxicos e podem causar graves danos ao ambiente caso não sejam manipulados corretamente.

Sendo assim, o reaproveitamento e a reutilização dos resíduos são altamente importantes para o processo de fabricação do papel, diminuindo custos e reduzindo os problemas do descarte. A casca de madeira e a serragem, por exemplo, podem ser utilizadas para geração de energia. O lodo primário, basicamente composto por fibras de celulose, pode ser usado na confecção de blocos de cerâmica vermelha, e, quando misturado à casca, pode ser aproveitado na compostagem. Lama de cal e cinzas podem ser usadas para correção e aumento da fertilidade dos solos, respectivamente.

Além dos resíduos industriais, o papel pós-consumo também pode ser reciclado. No entanto, conforme descrito anteriormente, apenas 45,5% do papel produzido no Brasil em 2010 foi reciclado e convertido em novos produtos na cadeia de consumo (BRACELPA, 2014).

### **3.4 Produção de papel reciclado**

A indústria do papel tem origem na reciclagem. O material começou a ser produzido através da reutilização de trapos, que eram convertidos em polpa para geração de outros produtos.

Para a produção de papel reciclado, deve ser utilizado um sistema de logística reversa que recolha aparas de papel pós-consumo. Isso pode ser feito por um sistema de coleta seletiva, ou por meio de catadores e cooperativas. As aparas passam por um processo de retirada de materiais perigosos (Clips, vidros, metais, etc.) e são destinadas à unidade de fabricação.

Na fábrica, esses resíduos são misturados em água numa espécie de liquidificador gigante, chamado Hidrapulper, visando triturar as aparas para formação de uma pasta de celulose. Essa pasta passa, geralmente, pelo processo de peneiramento para remoção de impurezas (plásticos, arames, entre outros) e pelo processo de remoção de tinta (“de-inking”), que utiliza surfactantes capazes de flotar as impurezas da solução.

Na produção de papel reciclado, também são adicionadas fibras virgens de celulose, obtidas através do cozimento de cavacos de madeira (em geral pelo processo Kraft de polpação). Em seguida, a polpa com fibras recicladas e virgens vai para etapa de branqueamento, seguindo o mesmo processo produtivo da obtenção do papel virgem.

A grande vantagem da utilização de fibras recicladas no processo se dá, em muitos casos, pela economia de água e energia e pelo aspecto ambiental, no qual menores árvores precisam ser cortadas para produção das fibras de celulose virgem e menor o impacto químico, devido a não utilização das aparas pós-consumo na etapa de polpação (na maioria das indústrias, o processo Kraft é o mais utilizado). A reciclagem também é responsável pela redução de custos na produção, e tem também grande impacto na geração de resíduos, uma vez que diminui a quantidade de lixo acumulado em aterros e nas áreas industriais.

Nos últimos anos, iniciativas governamentais vêm influenciando para a ocorrência de avanços nas técnicas de reciclagem, com maior aproveitamento das fibras e maior qualidade do produto final. O preço do papel reciclado, no entanto, ainda apresenta-se superior ao preço do papel comum. No Brasil, por exemplo, existe uma grande dificuldade na separação do lixo para retirada das aparas, visto que existem poucos

pontos de coleta seletiva. Isso dificulta o trabalho de cooperativas, catadores e das indústrias de papel para aquisição da matéria prima reciclada. Os altos custos de transporte e impostos também devem ser levados em conta (SANTOS *et al.*, 2010).

O processo de reciclagem dá origem a diversos produtos, que vão desde papéis para escrita e impressão, até embalagens de alimentos e bens de consumo. Pelo alto poder calorífico, o papel pode ser utilizado na reciclagem energética, característica que deverá ganhar importância no futuro próximo. As fábricas são abastecidas por uma grande rede de cooperativas, fornecedores de papel pós-consumo e aparistas, gerando assim empregos e movimentando a economia.

A reciclagem também é responsável pela redução de custos na produção e tem também grande impacto na geração de resíduos, uma vez que diminui a quantidade de lixo acumulado em aterros e nas áreas industriais. Nos últimos anos, iniciativas governamentais vêm influenciando para a ocorrência de avanços nas técnicas de reciclagem, com maior aproveitamento das fibras e maior qualidade do produto final.

Atualmente, com exceção do papel utilizado por algumas indústrias que requerem qualidades especiais (como a indústria fotográfica), a maioria do papel que usamos é constituído em sua maior parte por fibras reutilizadas, como por exemplo, o papel de jornal, com cerca de 80% de fibras recuperadas.

Segundo OLIVEIRA *et al.* (2011), papel artesanal reciclado pode ser produzido por reciclagem de fibras secundárias (papel reutilizado), mistura de aparas com fibras vegetais e também com o uso somente de fibras vegetais. De uma forma geral, o preparo do papel artesanal engloba as seguintes etapas: seleção, separação, picotamento de fibras secundárias e vegetais, desinfecção com hipoclorito de sódio, cozimento da fibra com hidróxido de sódio, lavagem para retirar a soda, mistura das aparas beneficiadas com água, imersão de bastidores para dar forma ao produto final, secagem e prensagem. A polpa celulósica utilizada no processo de produção a partir de papel pós-consumo é feita a partir da hidratação de aparas de papel velho sob agitação. O papel é deixado submerso em água por 24 horas e, em seguida, é triturado em liquidificador por 3 a 5 minutos. A polpa pronta é vertida em um tanque de cimento, ou bacia e um bastidor é utilizado para dar forma ao papel. O papel reciclado artesanal pode ser produzido de diversas cores e tons, para isso é feito o tingimento das fibras no momento do cozimento, utilizando corantes.

### 3.5 Exemplos de produtos obtidos utilizando papel

Uma alternativa para a utilização de papel pós-consumo seria para fabricação de compósitos. Um material compósito é formado pela combinação entre dois ou mais materiais, produzindo uma mistura (seja ela física ou química) de uma fase contínua e outra descontínua (elemento de reforço e matriz), podendo ser na forma de partículas, fibras ou mantas. De acordo com a composição de cada elemento na mistura, o composto final pode ter suas propriedades significativamente melhoradas. Assim, as fibras de celulose do papel funcionariam como reforço para o material.

Compósitos de bagaço de mandioca com adição 10% de papel kraft foram utilizados na produção de bandejas descartáveis para acondicionamento de frutas e hortaliças (MATSUI *et al*, 2003). Para fabricação dos compósitos, uma suspensão foi preparada pela adição de água ao bagaço, na proporção mássica de 10:1. Essa suspensão foi aquecida sob agitação e mantida a 70°C durante 40 minutos. Esse procedimento promoveu a gelatinização do amido aderido às fibras do bagaço, formando uma massa homogênea, que foi colocada em um misturador Meteor, modelo Rex-1, durante 5 minutos. Paralelamente, uma suspensão aquosa de papel Kraft também foi preparada em um misturador, na proporção água/papel de 100:1 (v/p), e misturada durante dez minutos para a desagregação das fibras. As duas suspensões foram misturadas e mantidas sob agitação mecânica durante cinco minutos, de modo a obter uma polpa com relação mássica final bagaço/papel Kraft de 9:1.

Quadros com telas de náilon, de 30x 40 cm, foram imersos em um recipiente contendo a polpa fina e suspensos até a superfície, permitindo o escoamento da água e permanência do material sobre as telas. Estas foram colocadas em estufa a 100°C durante duas horas, para secagem. As bandejas fabricadas a partir dos compósitos apresentaram propriedades semelhantes às de bandejas de papelão, produzidas a partir de papel reciclado.

Compósitos verdes à base de amido termoplástico, derivado de tapioca, e reforçados com 0-8 % (m/m) de fibras de celulose extraídas de papel reciclado foram produzidos pela técnica de moldagem por compressão (WATTANAKORNSIRI *et al.*, 2012). Para o preparo dos compósitos, as fibras de celulose foram extraídas de papéis de escritório ou de jornais pelo processo de “deinking-washing”. Neste processo, cada tipo de papel e os produtos de branqueamento (hidróxido de sódio e silicato de sódio) foram misturados

com água destilada até atingir 2L e mantidos sob agitação mecânica a 800 RPM e 45°C por 20 min. A polpa de papel foi colocada em uma tela de 16 mesh, lavou-se com água corrente da torneira (cerca de 30L) e, sucessivamente, com água destilada (1L) até pH 7 foi atingido. Em seguida, as fibras restantes foram dispersas em água destilada e banho de ultrassom. Os resultados mostraram que a adição das fibras melhorou a resistência mecânica, módulo de elasticidade, estabilidade térmica e resistência à água dos compósitos quando comparados ao amido termoplástico sem reforço, independente do tipo de papel utilizado.

Outro exemplo de materiais compósitos feitos a partir de fibras de celulose foi estudado por SULLCAHUAMÁN *et al.*, 2007, no qual foi verificado o efeito da adição de aparas de papel à uma matriz de cimento, visando a formação de um concreto de maior resistência e menor custo. Para a fabricação das amostras, o papel foi colocado em um misturador e convertido em polpa, mediante adição de uma quantidade adequada de água. Nela, foi adicionada uma solução de quitosana 1% (p/v), cimento, e dependendo da amostra, fibras de sisal tratadas quimicamente. Em seguida, a polpa foi colocada em molde e por meio de vibração e aplicação de vácuo, as fibras se distribuíram corretamente e o processo foi finalizado com aplicação de uma pressão específica.

Os resultados mostraram uma alta resistência à flexão do material obtido com 55% de pasta de papel e 5% de quitosana (13,53 MPa), superando o valor mínimo requerido pela Norma ASTM C1225 (5,5 MPa).

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo são apresentados e descritos a metodologia e os materiais utilizados para a fabricação dos aglomerados.

### **4.1 Materiais**

Alguns elementos foram adicionados aos aglomerados de papel produzidos, visando a melhoria das propriedades desejadas. Entre eles estão o amido de tapioca, óleo vegetal e carbonato de cálcio, descritos a seguir:

#### **4.1.1 Papel**

Foram utilizados papéis pós-consumo do tipo Sulfite, sem pauta no formato A4.

Os papéis foram picotados manualmente em pequenos pedaços para facilitar a formação da polpa no liquidificador.

#### **4.1.2 Amido de tapioca**

Foi utilizada a goma de mandioca hidratada da marca Toque do Nordeste. A goma foi conservada em local refrigerado durante o período de experimentos, conforme orientação do fabricante.

#### **4.1.3 Óleo vegetal**

Foi utilizado o óleo de soja da marca Liza.

#### **4.1.4 Carbonato de cálcio**

Foi utilizado o Carbonato de Cálcio natural adquirido na empresa LokalFibra Comércio e Fabricação de Fiberglass.

#### **4.1.5 EPS**

Foi utilizada uma placa de EPS com 10 mm de espessura comprada em papelaria.

### **4.2 Fabricação da polpa**

A 300 ml de água destilada, foram adicionados: 20% (v/v) de óleo vegetal, 4% (p/v) de papel pós-consumo e diferentes teores de amido de tapioca (4%, 8% e 12% (p/v)) e de  $\text{CaCO}_3$  (0%, 5% e 10%(p/v)). A mistura foi homogeneizada em um liquidificador convencional por 1 ou 6 minutos para permitir a desagregação das fibras. Em seguida, a polpa formada foi coada em peneira de nylon com abertura de 1 mm para remoção do líquido em excesso. A Tabela 2 lista a quantidade de cada componente e o tempo de homogeneização utilizado para o preparo das diferentes amostras.

Tabela 2: Variação da quantidade de componentes e do tempo de homogeneização ( $t_H$ ) utilizados para o preparo das amostras.

Amostras	Papel(g)	Óleo(ml)	Amido de Tapioca(g)	CaCO <sub>3</sub> (g)	$t_H$ (min)
7.1	12	60	12	0	6
7.2	12	60	12	15	6
7.3	12	60	12	30	6
8.1	12	60	12	0	1
8.2	12	60	12	15	1
8.3	12	60	12	30	1
9.1	12	60	12	0	6
9.2	12	60	12	15	6
9.3	12	60	12	30	6
9.101	12	60	24	0	6
9.102	12	60	36	0	6

### 4.3 Fabricação dos aglomerados

Além da variação do teor de elementos adicionados à mistura para formação dos aglomerados de papel, o processo de secagem variou em função das amostras produzidas. A Tabela 3 classifica a variação nos períodos de secagem à diferentes temperaturas.

Para obtenção das amostras, a polpa ainda úmida foi comprimida contra uma placa de Petri, utilizando-se um modelador com 10,5 cm de diâmetro e 1,5 cm de altura. Por meio da aplicação da pressão até uma marca pré-programada no modelador, todas as amostras foram modeladas com espessura de 1 cm (Figura 6). Após a modelagem, as amostras foram submetidas a um processo de secagem alternando períodos em estufa com circulação forçada de ar (mod. 400-2ND, Nova Ética) e de secagem a temperatura ambiente (23°C), conforme apresentado na Tabela 3. Algumas amostras (série 7) foram secas em estufa a 37°C por 9 horas, com intervalo de secagem a temperatura ambiente por 13 horas e secagem final em estufa a 37°C por mais 7 horas. As demais amostras (séries 8 e 9) foram secas em estufa a 50°C por um período de 6 horas, com intervalo de secagem a 18 horas e secagem final a 50°C por mais 2 horas.

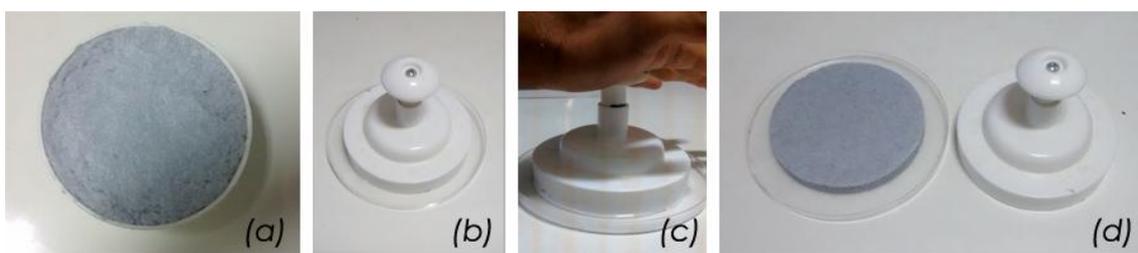


Figura 6 – Etapas da fabricação das amostras. Polpa colocada no modelador em posição invertida (a). Modelador posicionado em placa de Petri (b). Pressão aplicada até espessura desejada(c). Retirada do modelador, com amostra pronta para secagem (d).

Tabela 3: Etapas de secagem utilizadas para o preparo das amostras.

Amostras	Etapa 1 -	Estufa	Etapa 2 -	Ambiente	Etapa 3 -	Estufa2
	Temperatura (°C)	Período (h)	Temperatura (°C)	Período (h)	Temperatura (°C)	Período (h)
7.1	37	9	23	13	37	7
7.2	37	9	23	13	37	7
7.3	37	9	23	13	37	7
8.1	50	6	23	18	50	2
8.2	50	6	23	18	50	2
8.3	50	6	23	18	50	2
9.1	50	6	23	18	50	2
9.2	50	6	23	18	50	2
9.3	50	6	23	18	50	2
9.101	50	6	23	18	50	2
9.102	50	6	23	18	50	2

Após a secagem, as amostras foram cortadas nas dimensões aproximadas de 1,5 cm x 1,5 cm para caracterização (densidade/porosidade e ensaios de compressão). A espessura das amostras variou de acordo com a condição experimental utilizada. Para retirada de rebarbas, as amostras foram lixadas com lixa d'água 400.

## 4.4 Caracterização

### 4.4.1 Determinação da porosidade e da densidade aparente

O Teste de Archimedes nos possibilita obter informações sobre a densidade, volume de poros e porosidade das amostras. Foi utilizada a balança analítica Gehaka, mod. AG200, com kit para medição de densidade, do Laboratório de Polímeros II do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/Poli/UFRJ. As amostras foram cortadas no formato cúbico com dimensões aproximadas de 1,5 cm x 1,5 cm x 1,0 cm (L x P x A).

As amostras foram imersas em etanol, seguindo o Princípio de Arquimedes, assumindo que todo corpo embebido em um fluido sofre, por parte do fluido, uma força vertical para cima, com intensidade igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo. Quando um corpo se encontra imerso em um líquido em repouso, duas forças estão atuando sobre ele: a força peso e a força de impulsão (GIBSON *et al.*, 2001)



Figura 7 – Montagem do experimento para determinação da porosidade e densidade aparente.

Para determinar a medida de densidade, foi necessário obter a massa real e a massa aparente das amostras. Estes valores foram aplicados à Equação 1, adotando a densidade do etanol como  $0,79 \text{ g/cm}^3$ .

$$\text{Densidade} = \frac{W_{\text{seco}} \times \rho_{\text{etanol}}}{(W_{\text{seco}} - W_{\text{molhado}})} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde  $W_{\text{seco}}$  é a massa referente à amostra seca,  $W_{\text{molhado}}$  é a massa referente à amostra imersa em etanol e  $\rho_{\text{etanol}}$  é a densidade do etanol a temperatura de execução do experimento.

A partir das dimensões das amostras, foi possível medir seu volume real utilizando a Equação 2:

$$V_{\text{real}} = l_1 \times l_2 \times \text{altura} \quad (\text{Equação 2})$$

A porosidade da amostra é dada pela relação entre seu volume real e o volume de vazios. Para medir o volume dos poros ( $V_{\text{poros}}$ ), utilizou-se a Equação 3:

$$V_{\text{poros}} = V_{\text{real}} - \frac{W_{\text{seco}}}{\text{densidade}} \quad (\text{Equação 3})$$

A porosidade aparente foi determinada de acordo com a Equação 4:

$$\text{Porosidade} = \left( \frac{V_{\text{poros}}}{V} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

#### 4.4.2 Teste de Compressão

A avaliação das propriedades mecânicas dos aglomerados e do EPS comercial foi realizada por meio de testes de compressão conduzidos no Laboratório de

Propriedades Mecânicas (PROPMEC) do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/Poli/UFRJ. Os ensaios foram conduzidos numa máquina de teste universal (EMIC DL 10000), utilizando uma célula de carga de 50 Kgf e velocidade do travessão de 5 mm/min. Os ensaios foram realizados em triplicatas.

#### **4.4.3 Microscopia Óptica**

A caracterização morfológica dos aglomerados foi realizada por microscopia óptica, utilizando um microscópio estereoscópio Coleman mod. NSZ-405, acoplado a uma câmera NEX-F3 Sony. Estas análises foram realizadas no Laboratório de Polímeros II do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/Poli/UFRJ.

### **5 RESULTADOS**

#### **5.1 Avaliação geral das amostras**

Na Figura 8 são apresentadas as amostras produzidas de acordo com as composições e condições experimentais descritas nas Tabelas 2 e 3. Observa-se uma variação na coloração das amostras decorrente da presença de pigmentos (tinta de impressão) das folhas de papel utilizadas. Algumas amostras que utilizaram papéis mais carregados de tinta obtiveram uma coloração acinzentada.

Como neste trabalho buscou-se um processo mais econômico, optou-se por não submeter os papéis à etapa de despigmentação (“de-inking”) geralmente presente na produção de papel reciclado. Além disso, a presença de pigmentos não afetaria às características do material a ser produzido.



Figura 8 – Amostras de diferentes colorações em função de suas composições e do papel utilizado na mistura.

O material estudado, apesar de apresentar-se visivelmente coeso, mostrou certa fragilidade ao corte. Na etapa de preparação das amostras, o papel formava farelos e em alguns casos, pequenos gomos eram removidos durante o corte (Figura 9). O mesmo acontecia para o EPS, porém em menores proporções.



Figura 9 – Amostras do aglomerado 9.102 logo após o corte.

## 5.2 Efeito da variação da temperatura de secagem na estufa

As amostras 7.1, 7.2, 7.3 e 9.1, 9.2 e 9.3 apresentam a mesma composição e foram obtidas utilizando o mesmo tempo de agitação, diferindo apenas na temperatura de secagem em estufa: 37°C, para as amostras da série 7 e 50°C para as amostras da série 9. O segundo índice de cada série (X.1, X.2, X.3) corresponde a teores crescentes de CaCO<sub>3</sub> adicionados a cada composição. Pela Figura 10 pode-se perceber que as amostras da série 9 apresentam menor grau de compactação, com formação de gomos mais dispersos e maior número de vazios ou irregularidades em sua estrutura.

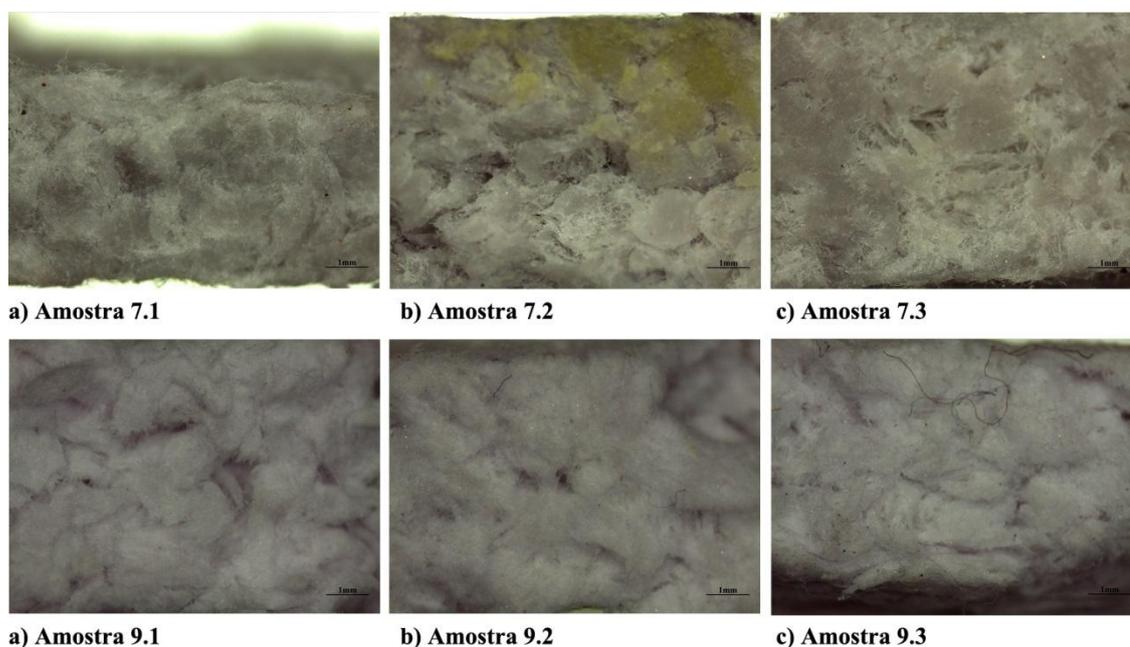


Figura 10 – Imagens das amostras da série 7 e série 9 em lupa

Como demonstrado pela Tabela 4, o aumento da temperatura pouco alterou a densidade final das amostras, porém mostrou significativo aumento tanto na porosidade, quanto no volume de poros das amostras, conseqüentemente.

De acordo com VIEIRA e ROCHA (2007), as propriedades finais do papel reciclado são fortemente afetadas pelas condições de secagem da polpa de celulose. Durante a secagem, dois fenômenos podem ocorrer: encolhimento e endurecimento

(“hardening phenomenon”). À medida que a água é removida da polpa, as fibras de celulose se aproximam, aumentando a resistência da rede fibrosa e levando ao encolhimento do papel (fenômeno de encolhimento). No entanto, quando a secagem ocorre a temperaturas mais elevadas, a superfície externa do papel se torna rígida e o volume final do papel é fixado antes da secagem completa, contribuindo, assim, para a formação de um papel com menor densidade e maior porosidade (fenômeno de endurecimento).

Tabela 4: Variação de densidade, volume de poros e porosidade em relação à temperatura de secagem.

<b>Amostra</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume de Poros (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Porosidade (%)</b>
7.1	0,82 ± 0,05	0,31 ± 0,05	31,03 ± 4,43
7.2	0,83 ± 0,07	0,06 ± 0,06	4,62 ± 4,51
7.3	1,08 ± 0,08	0,31 ± 0,01	23,43 ± 6,31
9.1	0,8 ± 0,06	0,66 ± 0,09	48,05 ± 1,48
9.2	0,82 ± 0,01	0,76 ± 0,13	54,32 ± 3,57
9.3	0,94 ± 0,02	0,85 ± 0,07	43,06 ± 2,06

Como a série 9 apresentou maior porosidade, seu volume final deveria ter sido maior do que as amostras da série 7. Porém, de acordo com os dados da Tabela 5, nota-se que as amostras da série 7 (secas a temperatura inferior) apresentaram menor encolhimento final, com exceção da amostra 7.1 (sem adição de carbonato de cálcio).

Tabela 5: Variação do volume em relação à temperatura de secagem.

<b>Amostra</b>	<b>Temperatura de secagem</b>	
	<b>(°C)</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>
7.1	37	50,86 ± 0,20
7.2	37	59,00 ± 0,20
7.3	37	65,27 ± 0,09
9.1	50	53,97 ± 0,07
9.2	50	52,76 ± 0,11
9.3	50	56,52 ± 0,14

### 5.3 Efeito do tempo de homogeneização

Os resultados referentes às amostras 8.1, 8.2, 8.3 e 9.1, 9.2 e 9.3 estão apresentados nas Tabelas 6 e 7. A variação do tempo de homogeneização ( $t_H$ ) não trouxe diferenças significativas em relação às densidades e porosidades das amostras sem carbonato. No entanto, para as demais amostras, o aumento do tempo de homogeneização acarretou diminuição da densidade e, conseqüentemente, aumento da porosidade (Tabela 6). O aumento do  $t_H$  pode ter levado à maior absorção de ar pela polpa, possibilitando, assim, a formação de maior quantidade de vazios entre as fibras.

Tabela 6: Variação de densidade, volume de poros e porosidade em relação ao tempo de homogeneização ( $t_H$ ).

Amostra	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Volume de Poros (cm <sup>3</sup> )	Porosidade (%)
8.1	0,86 ± 0,06	0,77 ± 0,07	52,11 ± 2,48
8.2	0,96 ± 0,02	0,62 ± 0,04	41,54 ± 1,65
8.3	1,15 ± 0,19	0,64 ± 0,18	41,26 ± 11,59
9.1	0,80 ± 0,06	0,66 ± 0,09	48,05 ± 1,48
9.2	0,82 ± 0,01	0,76 ± 0,13	54,32 ± 3,57
9.3	0,94 ± 0,02	0,85 ± 0,07	43,06 ± 2,06

Porém, notou-se uma redução no volume para as amostras com tempo de homogeneização maior (Tabela 7).

Tabela 7: Variação do volume em relação ao tempo de homogeneização ( $t_H$ ).

Amostra	Tempo de Homogeneização (min)	Volume (cm <sup>3</sup> )
8.1	1	61,29 ± 0,09
8.2	1	63,48 ± 0,22
8.3	1	73,65 ± 0,08
9.1	6	53,97 ± 0,07
9.2	6	52,76 ± 0,11
9.3	6	56,52 ± 0,14

## 5.4 Efeito do teor de amido na composição

Os resultados referentes às amostras 9.1, 9.101 e 9.102 estão apresentados nas Tabelas 8, 9 e 10.

As amostras 9.101 e 9.102 foram produzidas sem adição de carbonato de cálcio em sua composição. O carbonato de cálcio foi adicionado às outras amostras devido sua propriedade aglomerante, no intuito de promover maior adesão das fibras de celulose. No entanto, foi observado, manualmente, que a presença do carbonato de cálcio na mistura causou maior fragilidade e densificação do material, não contribuindo para nenhuma melhoria em suas propriedades.

Pela Tabela 8, nota-se que a variação no teor de amido pouco influenciou na densidade das amostras. O mesmo ocorre para as medidas de volume de poros e porosidade, onde pouco se pode afirmar, visto que o desvio padrão apresentado nessas amostras dificultam a análise dos resultados. Esse fato pode ser explicado pela não uniformidade das amostras. Uma vez que o material foi produzido adotando um método de secagem livre, sem molde ou sem restrição ao espalhamento, as amostras apresentaram deformações pontuais ao longo do material, causando uma grande variação na estrutura dos corpos de prova. A Figura 11 revela a pequena diferença na morfologia das amostras analisadas.

Tabela 8: Variação de densidade, volume de poros e porosidade em relação ao teor de amido na composição.

<b>Amostra</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume de Poros (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Porosidade (%)</b>
9.1	0,8 ± 0,06	0,66 ± 0,09	48,05 ± 1,48
9.101	0,85 ± 0,02	0,55 ± 0,20	41,79 ± 11,41
9.102	0,85 ± 0,03	0,58 ± 0,17	40,97 ± 7,33



Figura 11 – Microscopia das amostras 9.1, 9.101 e 9.102 indicando a variação do teor de amido na composição.

De acordo com a empresa RENOVA PAPÉIS (Introdução aos processos de fabricação de papel e celulose), os amidos são empregados na indústria do papel para proporcionarem maior resistência, em processo conhecido como colagem superficial. A colagem superficial, entre outras coisas, dificulta a penetração de líquidos e aumenta as características mecânicas do material.

As curvas tensão x deformação obtidas com o teste de compressão exibiram três regiões, comumente observadas em estruturas porosas. A primeira região é denominada elasticidade linear (Região I, Figura 12), a inclinação desta curva fornece o módulo de compressão. A análise das curvas permite observar que a região de elasticidade ocorreu em valores baixos de tensões, acompanhada por um longo platô, caracterizando a segunda região (Região II, Figura 12). A região de elasticidade linear é controlada pela estrutura da parede dos poros e o platô é associado ao colapso dos poros. Quando a maioria dos poros apresentarem-se colapsados tem o início da terceira região (Região III, Figura 12), denominada densificação, caracterizada com a elevação acentuada na tensão, promovido pelo próprio sólido com a deformação compressiva adicional (GIBSON e ASHBY, 2001).

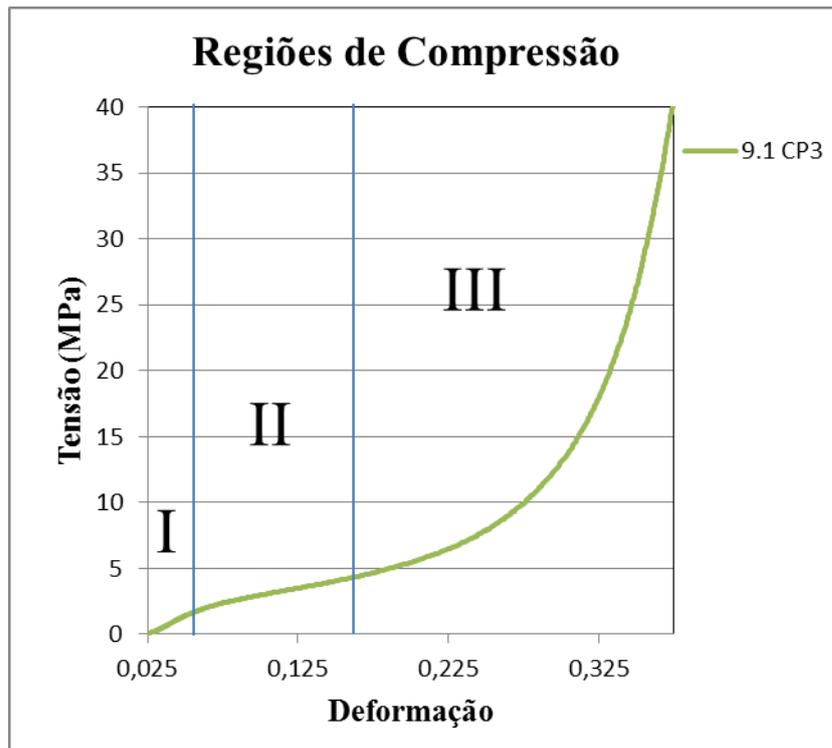


Figura 12 – 3 Regiões apresentadas a partir dos testes de compressão.

Na Figura 13, podemos observar o resultado geral para o teste de compressão, no qual foram analisadas 3 corpos de prova de cada amostra.

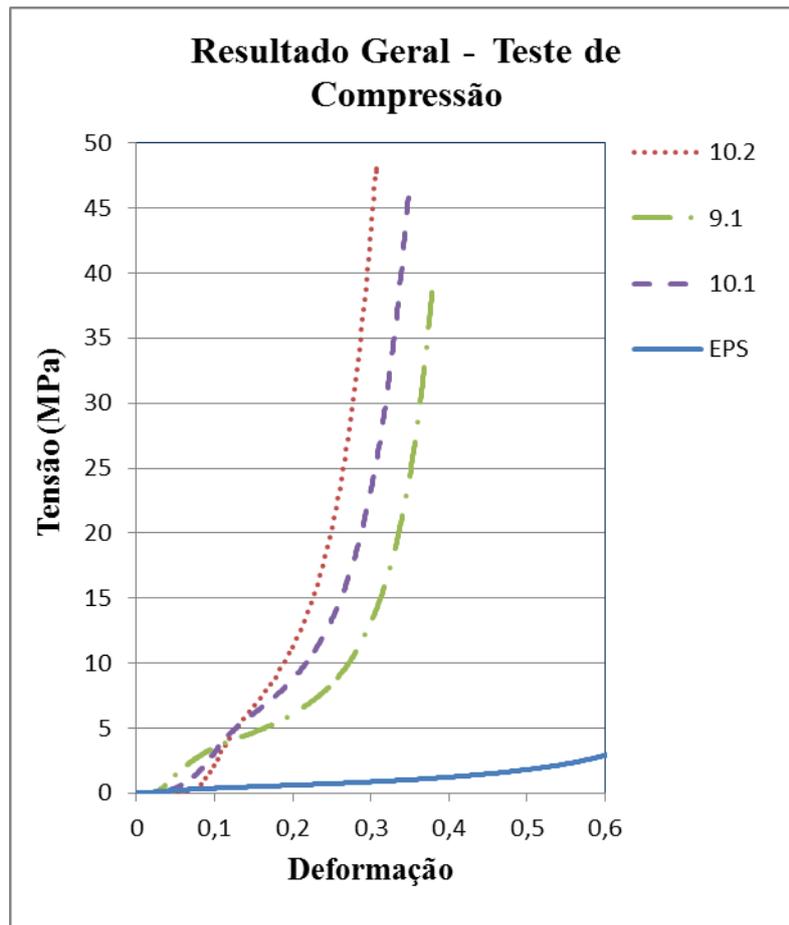


Figura 13 – Resultado geral do teste de compressão.

A partir do isolamento da região elástica linear do gráfico, foi obtido o módulo de elasticidade em compressão das amostras. Para este cálculo, foram eliminados os pontos iniciais, sendo considerados apenas os pontos da região linear.

Diferentemente das amostras produzidas, o gráfico de compressão do EPS (Figura 14) mostrou certa irregularidade em sua curva. Conforme descrito por GIBSON e ASHBY (2001), esse fato pode representar um mecanismo de compressão frágil, supostamente relacionado aos vazios existentes entre as células do EPS, como mostrado na Figura 15.

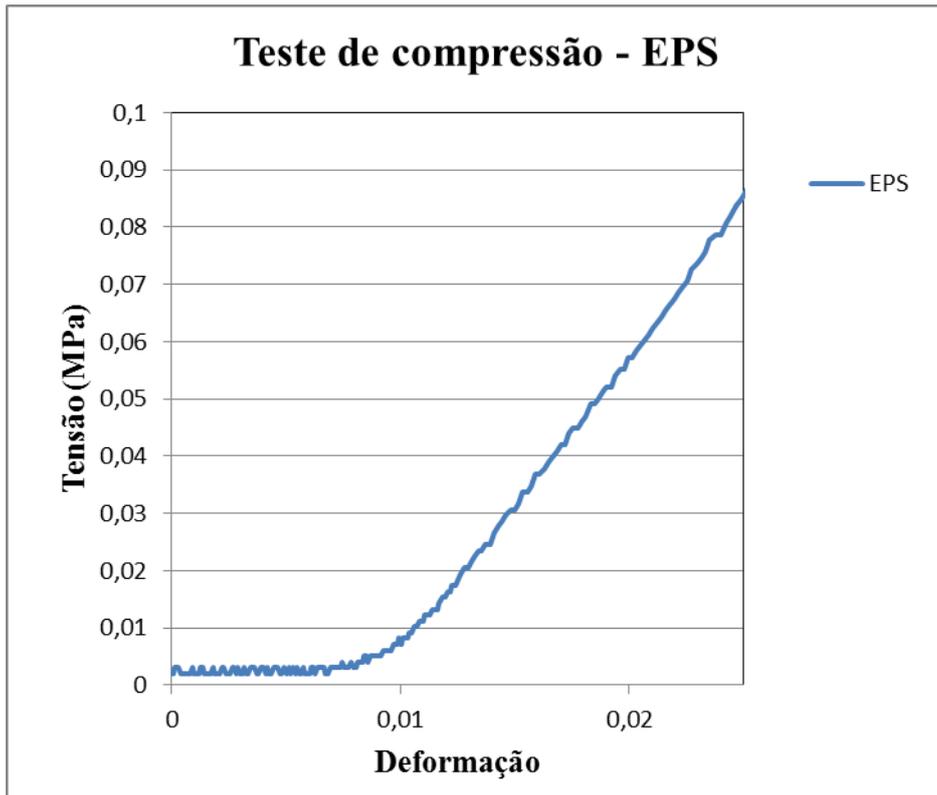


Figura 14 – Resultado do teste de compressão para a amostra de EPS.



Figura 15 – Microscopia de uma amostra de EPS

Os dados do Módulo de Young apresentados na Tabela 9 mostram que o aumento no teor de amido das amostras analisadas não causou nenhuma variação significativa em seus módulos de compressão.

Em comparação ao EPS, pode-se perceber que os aglomerados de papel apresentaram maior resistência à compressão, permanecendo por uma maior faixa de deformação na região elástica linear. No entanto, os aglomerados apresentaram uma rápida transição entre a região de colapso dos poros e a região de densificação. Dessa forma podemos concluir, então, que os aglomerados apresentaram maior resistência na região elástica, porém uma grande fragilidade após o colapso dos poros, com sua rápida densificação (esmagamento).

Já o EPS apresentou menor resistência à compressão, com pequena permanência na região elástica linear. Porém, apesar do menor módulo de elasticidade (apresentado na Tabela 9), o EPS permaneceu por um longo tempo na região II, caracterizada por um longo platô, no qual o colapso dos poros não resultou em sua densificação (o EPS não entrou na região III). Isso comprova a maior resistência à compressão desse material.

Tabela 9: Variação do Módulo de Young em relação ao teor de amido na composição.

Amostras	Teor de Amido (g)	Módulo de Young (MPa)
9.1	12	1,531 ± 0,006
9.101	24	1,546 ± 0,004
9.102	36	1,546 ± 0,003
EPS	-	1,315 ± 0,018

Sendo assim, o aumento no volume final das amostras com maior teor de amido pode ser explicado pelo possível aumento de sua resistência mecânica. A maior integridade estrutural pode ter feito com que as amostras conservassem o máximo possível o volume imposto ao modelar (Tabela 10).

Tabela 10: Variação do volume em relação ao teor de amido na composição.

Amostra	Teor de Amido (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )
9.1	12	53,97 ± 0,07
9.101	24	71,50 ± 0,15
9.102	36	74,58 ± 0,11

Ao final do trabalho, foi criado um protótipo de aglomerado de papel no formato de bandeja descartável. A composição escolhida foi a 9.102, devido sua maior resistência aparente.

Para produção da bandeja, a polpa molhada foi moldada manualmente sobre um molde de polipropileno e deixada secar a temperatura ambiente (Figura 16).



Figura 16 – Polpa úmida moldada em forma de EPS (a); Molde de EPS e bandeja pronta após secagem (b e c).

A Figura 17 mostra uma imagem da goma obtida por microscopia óptica de luz polarizada. A natureza semicristalina dos grãos de amido pode ser comprovada pela presença da cruz de malta em alguns grãos (identificado por setas).

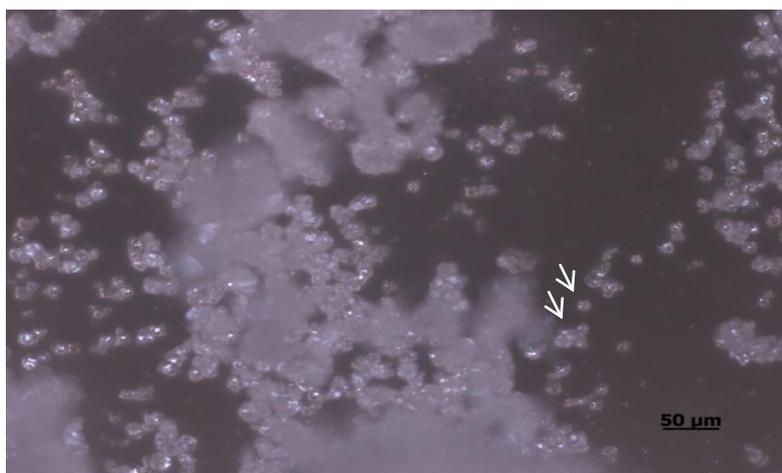


Figura 17 - Imagem obtida por microscopia óptica de luz polarizada da gota de amido de tapioca utilizada no presente trabalho.

## 6 CONCLUSÕES

Foi possível obter um protótipo de bandeja descartável utilizando as composições e o método proposto, apesar das composições testadas apresentarem comportamento mecânico e morfologia muito diferentes do EPS. No entanto, com o processo utilizado, obtiveram-se materiais com estrutura muito heterogênea.

Apesar das variações encontradas nos resultados, as seguintes conclusões puderam ser percebidas, em relação às diferentes amostras:

- O aumento da temperatura de secagem parece ter formado amostras com maior porosidade. Dessa forma, a eliminação da umidade presente na polpa deu lugar a vazios na estrutura.
- Em relação ao aumento do tempo de homogeneização, poucas mudanças foram percebidas. A polpa agitada por mais tempo pareceu acumular mais ar, porém na etapa de peneiramento parte das bolhas de ar formadas foram removidas da estrutura.
- Já a variação no teor de amido resultou numa estrutura mais resistente. Na etapa de corte das amostras pode-se perceber menor formação de rebarba nas amostras com maior teor de amido. A bandeja produzida com o material 9.102 apresentou-se coesa e com certa rigidez.
- O teste de Archimedes revelou baixa densidade dos aglomerados produzidos. Porém, o protótipo de bandeja apresentou-se mais denso do que a bandeja de EPS, fato este que pode ter sido resultado da dificuldade na distribuição da polpa modelada manualmente. Não foi possível determinar a densidade do EPS pelo Método de Archimedes, pois o material não afundou em álcool, água e/ou óleo mineral.
- A adição de carbonato de cálcio aumentou a densidade final das amostras e não teve nenhuma contribuição significativa nas propriedades do material, tornando sua presença dispensável.

- Os testes de compressão mostraram maior resistência à compressão e menor módulo de elasticidade por parte do EPS.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Testar outras metodologias de fabricação do aglomerado de papel, como por exemplo, a moldagem por compressão, a fim de obter melhores propriedades mecânicas com o tratamento térmico do material.

Avaliar a aplicação do processo de secagem a vácuo, buscando homogeneizar a estrutura do material formado.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, K. J., Uso de água em indústria de celulose sob a óptica da gestão de recursos hídricos. D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil., 2008.

BARUD, H. S., Preparo e caracterização de novos compósitos de celulose bacteriana. D.Sc., Universidade Estadual Paulista, Araraquara, Brasil., 2006.

BRACELPA – Associação Brasileira de Celulose e Papel, Dados do Setor Mar-2014, São Paulo. Disponível em: <http://bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/booklet.pdf>. Acesso em: 13 ago.2015.

<<http://bracelpa.org.br/bra2/?q=en/node/140>>. Acesso em: 13 ago. 2015.

<<http://www.celuloseriograndense.com.br/produtos>>. Acesso em: 14 ago. 2015.

CHAGAS, F. H. C., BERRETTA-HURTADO, A. L., GOUVÊA, C. A. K., 2011, " Logística Reversa: Destinação dos Resíduos de Poliestireno Expandido (Isopor®) Pós-Consumo de uma Indústria Catarinense". In: Cleaner Production Initiatives and Challenges for a Sustainable World, São Paulo, Brasil, 18-20 Maio.

DONINI, A. N., SALVI, D. T. B., FUKUMOTO, F. K., *et al.* " Biossíntese e recentes avanços na produção de celulose bacteriana ", Eclética Química v. 35, n. 4, pp. 165-178, 2010.

GIBBONS, J. H., 1989, "The Pulp and Paper Making Processes". In: Technologies for Reducing Dioxin in the Manufacture of Bleached Wood Pulp: Background Paper, cap.2, Washington, DC, U.S. Congress, Office of Technology Assessment.

GIBSON, L. J., ASHBY, M. F., Cellular Solids – Structure and properties, United Kingdom, 2 Ed., Cambridge University Press, 2001.

GUERRA, M. A. S. L., Avaliação de indicadores biológicos e físico-químicos no composto orgânico produzido a partir de resíduos da indústria de celulose. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil., 2007.

KLEMM, D. *et al.*, *Comprehensive Cellulose Chemistry: Fundamentals and Analytical Methods*. 1 ed. Weinheim: Wiley-VCH, v. 1, 1998.

MARENGO, V. A., VERCELHEZE, A. E. S., MALI, S. "Compósitos biodegradáveis de amido de mandioca e resíduos da agroindústria", *Química.Nova* v. 36, n. 5, pp. 680-685, 2013.

MATSUI, K. N., LAROTONDA, F. D. S., LUIZ, D. B., *et al.* "Utilização de resíduo de mandioca na produção de bandejas descartáveis", *Revista Ceres* v. 50, n. 292, pp. 727-736, 2003.

<<http://www.na.sappi.com/eQ/files/infographics/water.pdf>>. Acesso em: 14 ago. 2015.

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 & Tecnologia* v. 1, n. 1, pp. 1-5, 2007.

OLIVEIRA, D.B., NICOLIN, L., TONELLA, C., *et al.*, "Produção de papel artesanal em cooperativas de reciclagem com aparas de papel e fibras vegetais", 2011. Disponível em: <  
[http://www.nemo.uem.br/artigos/producao\\_de\\_papel\\_artesanal\\_iceri\\_celene\\_oliveira.pdf](http://www.nemo.uem.br/artigos/producao_de_papel_artesanal_iceri_celene_oliveira.pdf)  
>. Acesso em: 13 ago. 2015.

PANG, P., KHOULTCHAEV, K. K., ENGLEZOS, P. "Inhibition of the dissolution of papermaking grade precipitated calcium carbonate filler", *Tappi Journal* v. 81, n. 4, pp. 188-192, 1998.

PINHEIRO, R. M., VIEIRA, C. M. F., RPDRIGUEZ, R. S., *et al.* "Reciclagem de resíduo proveniente da produção de papel em cerâmica vermelha", *Revista Matéria* v. 13, n. 1, pp. 220 – 227, 2008.

RAMÍREZ, M. G. L., GUERRA, M. A. S. L., Avaliação de indicadores biológicos e físico-químicos no composto orgânico produzido a partir de resíduos da indústria de celulose. D.Sc., Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil., 2011.

SANGSEETHONG, K., LERTPHANICH, S., SRIROTH, K. . "Physicochemical Properties of Oxidized Cassava Starch Prepared under Various Alkalinity Levels", *Starch/Stärke* v. 61, n. 2, pp. 92-100, 2009.

SANTOS, C. P., REIS, I. N., MOREIRA, J. E. B., *et al.*, 2001, “Papel: como se fabrica?”, Química Nova na Escola, v. 14, Novembro. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc14/v14a01.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2015.

SANTOS, G. P., ALVES, D. F., PAIVA, L. S., *et al.*, 2010, “A cadeia do papel/papelão comum e o reciclado: uma análise comparativa na indústria de embalagens”. XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, São Carlos, Brasil, 12-15 de outubro.

SILVA, R., HARAGUCHI, S. K., MUNIZ, E. C., *et al.* "Aplicações de fibras lignocelulósicas na química dos polímeros e em compósitos", Quim. Nova v. 32, n. 3, pp. 661-671, 2009.

SULLCAHUAMÁN, J. A., *et al.*, 2007, “Materiales compuestos de cemento, papel reciclado, quitosano y refuerzo de fibras de sisal químicamente modificadas”. 8o CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA MECÁNICA , Cusco, Peru, 23-25 de octubre.

<[www.tecnicepa.com/files/CelulosePapel.doc](http://www.tecnicepa.com/files/CelulosePapel.doc)>. Acesso em: 14 ago. 2015.

VIEIRA, M. G. A., ROCHA, S. C. S. "Drying conditions influence on physical properties of recycled paper", Chemical Engineering and Processing v. 46, n. 10, pp. 955-963, 2007.

WATTANAKORNSIRI, A., PACHANA, K., KAEWPIROM, S., *et al.*, “Preparation and Properties of Green Composites Based on Tapioca Starch and Differently Recycled Paper Cellulose Fibers”, Journal of polymers and the environment v. 20, n. 3, pp. 801-809, 2012.