

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**REAPROVEITAMENTO DO PAPEL MOEDA RETIRADO
DE CIRCULAÇÃO PARA A INDÚSTRIA PAPELEIRA**

LOUREINE RAPÔSO OLIVEIRA GARCEZ

**ORIENTADOR: PROF. DR. JOAQUIM CARLOS GONÇALEZ
CO-ORIENTADORA: PROFA. DRA. THÉRÈSE HOFMANN GATTI
CO-ORIENTADOR: PROF. DR. FRANCIDES GOMES DA SILVA
JÚNIOR**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**PUBLICAÇÃO PPGEFL.DM - 215/2013
BRASÍLIA/DF: MAIO - 2013**

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

REAPROVEITAMENTO DO PAPEL MOEDA RETIRADO DE
CIRCULAÇÃO PARA A INDÚSTRIA PAPELEIRA

LOUREINE RAPÔSO OLIVEIRA GARCEZ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

Prof. Dr. Joaquim Carlos Gonzalez (Departamento de Engenharia Florestal, UnB). **(Orientador)**

Prof. Dr. Ailton Teixeira Vale (Departamento de Engenharia Florestal, UnB). **(Examinador Interno)**

Prof. Dr. Paulo Anselmo Ziani Suarez (Instituto de Química, UnB). **(Examinador Externo)**

Prof. Dr. Alexandre Florian da Costa (Departamento de Engenharia Florestal, UnB). **(Examinador Suplente)**

Brasília, 23 de maio de 2013

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da
Universidade de Brasília. Acervo 1009183.**

Garcez , Loureine Rapôso Oliveira.

G215r Reaproveitamento do papel moeda retirado de circulação
para a indústria papelreira / Loureine Rapôso Oliveira
Garcez. - - 2013.
xii, 56 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade de Brasília,
Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia
Florestal, 2013 .

Inclui bibliografia.

Orientação : Joaquim Carlos Gonçalves ; Co-orientação :
Thérèse Hofmann Gatti, Francides Gomes da Silva Júnior.

1. Resíduos de papel - Reaproveitamento. 2. Fibras.
I. Gonçalves, Joaquim Carlos. II. Gatti, Thérèse Hofmann.
III. Silva Júnior, Francides Gomes da. IV. Título.

CDU 676 . 017

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GARCEZ, L.R.O. (2013). Reaproveitamento do papel moeda retirado de circulação para a indústria papelreira. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Loureine Rapôso Oliveira Garcez

TÍTULO: Reaproveitamento do papel moeda retirado de circulação para a indústria papelreira

GRAU: Mestre

ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito da autora.

Loureine Rapôso Oliveira Garcez
QE 44 conjunto J casa 03, Guará II.
71070-107 – Brasília – DF – Brasil.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, José de Ribamar (*in memoriam*) e Josilene que me ensinaram tudo sobre a vida, a esperança e a longa jornada adiante. A finalização desse estudo representa a conquista de mais uma grande etapa da minha vida, obrigada por todo o apoio e incentivo nessa caminhada. Essa conquista é nossa! Sempre sentirei sua falta pai. Amo muito vocês!

AGRADECIMENTOS

A Deus que sempre está ao meu lado, na dor e na alegria, dando-me saúde e força para prosseguir na jornada.

À minha família pelo amor, carinho, apoio, incentivo e suporte ao longo dessa jornada.

À minha grande amiga Suellen, cuja as palavras não são suficientes para agradecer tudo que fez por mim. Muito obrigada amiga!

Aos meus colegas de Mestrado, em especial às minhas amigas Marcela e Eduarda pelo convívio e amizade solidificada ao longo da caminhada na UnB desde a graduação.

A toda a equipe do LQCE/ESALQ que sempre estavam disponíveis para me ajudar, em especial: Tiago, Eraldo, Magnos e Denis pela imensa paciência, disposição e dedicação a me ajudar no desenvolvimento deste trabalho.

Meu especial agradecimento ao Prof. Joaquim e à Prof^a. Thérèse pela confiança, apoio, paciência e credibilidade durante toda a realização deste trabalho.

Ao Prof. Francides pela co-orientação.

À CAPES pelo suporte financeiro.

Agradeço a todas as pessoas do meu convívio que acreditaram e contribuíram, mesmo que indiretamente, para a conclusão do meu mestrado.

RESUMO

REAPROVEITAMENTO DO PAPEL MOEDA RETIRADO DE CIRCULAÇÃO PARA A INDÚSTRIA PAPELEIRA.

O resíduo gerado a partir das cédulas inservíveis que foram retiradas de circulação pelo Banco Central do Brasil (BACEN) tem o potencial para serem recicladas, sendo uma alternativa para a obtenção de polpa reciclada para a indústria papeleira. Este trabalho teve como objetivo caracterizar a qualidade da polpa fabricada a partir do reaproveitamento de fibras do papel moeda retirado de circulação utilizando o processo termomecânico. Para o processo de individualização das fibras foi utilizado dispersão a quente à 80°C, variando-se o tempo em horas (4, 8, 16 e 32) e as cargas de dispersante químico (0, 1, 2, 4 e 8%). Ao final de cada tratamento as polpas foram refinadas e depuradas para se efetuar as análises do rendimento bruto, rendimento depurado, teor de rejeitos, viscosidade, licor de cozimento e ensaios físico-mecânicos das folhas. O dispersante não apresentou influência direta nos tratamentos e o rendimento bruto médio manteve-se acima de 88% em todos os tratamentos. A variação exponencial do tempo influenciou no teor de rejeitos final das polpas, assim como nos resultados da refinação, indicando que quanto mais refinada maior o rendimento depurado da polpa. O dispersante não apresentou influência direta nos tratamentos e a polpa com este, mostrou tendência de viscosidade superior. O licor gerado nos tratamentos não apresenta um fator de contaminação para a maior parte dos parâmetros. No entanto, o cobre representa um possível fator de risco de contaminação de corpos receptores, recomendando-se cuidados em seu descarte. A polpa produzida mostrou ter propriedades físico-mecânicas semelhantes a outras polpas de mercado. Os resultados do processo termomecânico adotado neste estudo apresentaram rendimentos e qualidades tecnológicas apropriadas para a produção de polpa reciclada a partir do papel moeda.

Palavras-chave: reciclagem, papel moeda, fibras.

ABSTRACT

REUSE PAPER CURRENCY REMOVED FROM CIRCULATION FOR THE PAPER INDUSTRY.

The waste generated from the useless bills that were removed from circulation by the Central Bank of Brazil (BACEN) has potential to be recycled, being an alternative to obtain recycled pulp for the paper industry. The goal of this work was to characterize the quality of the pulp produced from the reuse of currency fibers removed from circulation using the thermomechanical process. Process for individualisation of the fibers was used hot dispersion at 80 °C, varying the time in hours (4, 8, 16, 32) and chemical dispersant concentration (0, 1, 2, 4, 8%). At each end treatment, the pulps were refined and purified to make the analysis of gross yield, purified yield, rejects content, viscosity, cooking liquor and physico-mechanical paper. The dispersant did not show direct influence on the treatments and the average gross yield remained greater than 88% in all treatments. The exponential variation of the time influence in the end rejects content of pulps , as well as results from refining, indicating that the more refined, higher the purified yield of pulp. The dispersant didn't show direct influence on the treatments and their pulps showed trends of higher final viscosity. The liquor generated in the treatment doesn't show a contamination factor for most parameters, but copper is a possible risk factor for infection of receptor bodies. The pulp produced showed to have physical mechanical properties similar to other market pulps. The results of the thermomechanical process used in this study had yields and technology qualities appropriate for the production of recycled pulp from currency.

Keywords: *recycling, paper currency, fibers.*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	2
	2.1. OBJETIVO GERAL	2
	2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3	HIPÓTESE.....	3
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
	4.1. MATÉRIA-PRIMA.....	3
	4.1.1. Características do Papel Reciclado.....	5
	4.2. POLPAÇÃO TERMOMECÂNICA.....	8
	4.2.1. Licor de cozimento	10
	4.3. QUALIDADE DA POLPA.....	11
	4.4. QUALIDADE DO PAPEL.....	13
5	MATERIAIS E MÉTODOS	17
	5.1. MATÉRIA-PRIMA.....	17
	5.2. TEOR SECO	18
	5.3. DENSIDADE APARENTE DA MATÉRIA-PRIMA.....	19
	5.4. CINZAS	19
	5.5. PROCESSO DE INDIVIDUALIZAÇÃO DAS FIBRAS	19
	5.6. PARÂMETROS DETERMINADOS NA POLPA.....	21
	5.7. PARÂMETROS DETERMINADOS NO LICOR	22
	5.8. MORFOLOGIA DAS FIBRAS DA POLPA DO PAPEL MOEDA	23
	5.9. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DAS POLPAS.....	24
	5.10. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA ..	25
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	25
	6.1. MORFOLOGIA DAS FIBRAS DA POLPA DO PAPEL MOEDA	25

6.2. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA.....	28
6.3. POLPAÇÃO.....	29
6.3.1. Rendimentos e Viscosidade	29
6.3.2. Análise do licor	35
6.4. TESTES FÍSICO-MECÂNICOS DAS POLPAS	39
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
ANEXOS	53

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Condições de tratamento para o processo de individualização das fibras do papel moeda.....	21
TABELA 2 - Parâmetros determinados na análise da polpa ao final de cada tratamento	21
TABELA 3 - Parâmetros determinados na análise dos licores coletados ao longo do processo de individualização das fibras	22
TABELA 4 - Refino e ensaios físicos de folhas formadas em laboratório	24
TABELA 5 - Valores médios das dimensões de fibras da polpa do papel moeda	25
TABELA 6 - Valores de dimensões de fibras de diferentes espécies e do material estudado.....	26
TABELA 7 - Propriedades básicas do papel moeda e teor de cinza da polpa na matéria-prima e nos tratamentos com dispersante	28
TABELA 8 - Valores de rendimentos e da viscosidade da polpa estudada, por tratamento	30
TABELA 9 - Valores médios do teor de rejeitos em relação ao tempo de cada tratamento	32
TABELA 10 - Valores médios do rendimento depurado em relação ao tempo de cada tratamento	33
TABELA 11 - Limites de lançamentos de efluentes da Resolução CONAMA nº430/2011 em comparação com os resultados dos parâmetros inorgânicos do licor gerado pelos tratamentos	37
TABELA 12 - Valores médios dos ensaios físico-mecânicos, das folhas formadas em laboratório, do tratamento sem dispersante	40
TABELA 13 (Anexo A) - ANOVA e análise descritiva do rendimento bruto dos tratamentos	54
TABELA 14 (Anexo A) - ANOVA e análise descritiva do teor de rejeitos sem refino dos tratamentos.....	54

TABELA 15 (Anexo A) - ANOVA e análise descritiva do teor de rejeitos com refino dos tratamentos.....	55
TABELA 16 (Anexo A) - ANOVA e análise descritiva do rendimento depurado sem refino dos tratamentos.....	55
TABELA 17 (Anexo A) - ANOVA e análise descritiva do rendimento depurado com refino dos tratamentos.....	56
TABELA 18 (Anexo A) - ANOVA e análise descritiva da viscosidade dos tratamentos	56

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Ciclo do numerário administrado pelo BACEN	4
FIGURA 2 - Papel moeda picotado em bloco.....	18
FIGURA 3 - Dispersor NETZSCH	20
FIGURA 4 - Refinador de discos da Regmed.....	20
FIGURA 5 - Espectrofotômetro iCAP 6000 Series da Thermo Scientific.....	23
FIGURA 6 - Rendimento bruto médio (RB) das polpas por tratamento.....	31
FIGURA 7 - Teor de rejeitos (TR) médio sem refino dos tratamentos.....	32
FIGURA 8 - Teor de rejeitos (TR) médio com refino dos tratamentos.....	33
FIGURA 9 - Viscosidade dos tratamentos à 0% e à 2% de dispersante químico.....	35
FIGURA 10 - pH final médio dos tratamentos	36

1 INTRODUÇÃO

A reciclagem representa um grande fator econômico e social para o setor papelero, por sua contribuição à conservação de recursos naturais e energéticos e pela proteção ao meio ambiente (IPT,1988b). Além de ser uma prática que reduz o impacto ao meio ambiente, o reaproveitamento dos resíduos provenientes de processos produtivos, também pode ser uma fonte de renda sob o ponto de vista econômico.

O Brasil, hoje é o quarto maior produtor mundial de celulose e o 9º maior produtor de papel. No ano de 2012, segundo a Associação Brasileira de Celulose e Papel (BRACELPA), das 10,2 milhões de toneladas de papéis produzidos no país 9,7 milhões de toneladas de papel foram para consumo interno. Deste montante, 45,5% foram recuperados, equivalendo a cerca de 4,4 milhões de toneladas de aparas recicladas (BRACELPA, 2013).

Os programas de reciclagem, medidas para poupar energia e linhas de pesquisa para inovações tecnológicas são práticas adotadas atualmente no setor de celulose e papel. Em meados de 1993, com o intuito de difundir a importância da coleta seletiva na sede do Banco Central do Brasil, localizada no Distrito Federal (BACEN/DF) foi desenvolvido um programa de reciclagem junto à Universidade de Brasília (UnB) (HOFMANN-GATTI et al., 1996). Os estudos proporcionaram o desenvolvimento de tecnologia para reaproveitar o papel moeda retirado de circulação (Patente nº PI96055081).

O recolhimento das notas inservíveis é realizado pelas unidades do BACEN distribuídas em 10 capitais do país. Substitui-se em média 40% do dinheiro em circulação por ano no país, isto é, dos cinco bilhões de notas em circulação são destruídas dois bilhões. Estima-se que o descarte do Banco Central no Distrito Federal seja em torno de 25 toneladas por mês e o descarte produzido por todas as unidades do Banco Central chega a ser de duas mil toneladas por ano, montante que é depositado diretamente em aterros sanitários (BECKER, 2012).

A norma ABNT NBR 15483 classifica as aparas de papel e papelão ondulado, definindo os parâmetros mínimos admissíveis dos níveis de contaminação com impurezas e/ou materiais proibitivos com o intuito de tornar

a apara utilizável para a reciclagem. O papel moeda se insere no grupo de aparas com considerável teor de materiais proibitivos, devido à presença de produtos que proporcionam a resistência a úmido, e com isso, acredita-se, que a sua reciclagem não pode ser realizada convencionalmente.

Num estudo à nível artesanal desenvolvido por GARCEZ (2010) foram analisadas as propriedades morfológicas das fibras de papel moeda disponibilizadas após o processo de quebra da resistência a úmido, proporcionando um material alternativo para a produção de papel no âmbito da reciclagem.

Entretanto, é preciso desenvolver técnicas a nível industrial para que o reaproveitamento celulósico do papel moeda satisfaça as exigências de recuperação de resíduos dispostas na Lei 12.305/2010, que trata da Política Nacional de Resíduos Sólidos, e que também seja viável ao fornecedor, no caso ao BACEN. Nesta direção, este estudo visa adequar o melhor processo de fabricação de polpa, a partir do papel moeda retirado de circulação por meio da análise da qualidade da polpa obtida após o processo de individualização das fibras.

2 OBJETIVOS

2.1.OBJETIVO GERAL

Este estudo tem por objetivo caracterizar a qualidade da polpa fabricada a partir do reaproveitamento das fibras do papel moeda retirado de circulação utilizando o processo termomecânico.

2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterização da produção da celulose fabricada a partir do papel moeda por meio da avaliação do rendimento utilizando-se o processo termomecânico.
- Caracterização tecnológica da polpa fabricada por meio da determinação de suas propriedades básicas (teor seco, densidade aparente e cinzas), das dimensões de fibras, além da análise do licor de cozimento resultante do processo.
- Determinação das propriedades físico-mecânicas da polpa produzida.

3 HIPÓTESE

O papel moeda retirado de circulação pelo Banco Central do Brasil, apresenta potencial tecnológico para o reaproveitamento de suas fibras para a produção de polpa celulósica recuperada visando a fabricação de papel.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. MATÉRIA-PRIMA

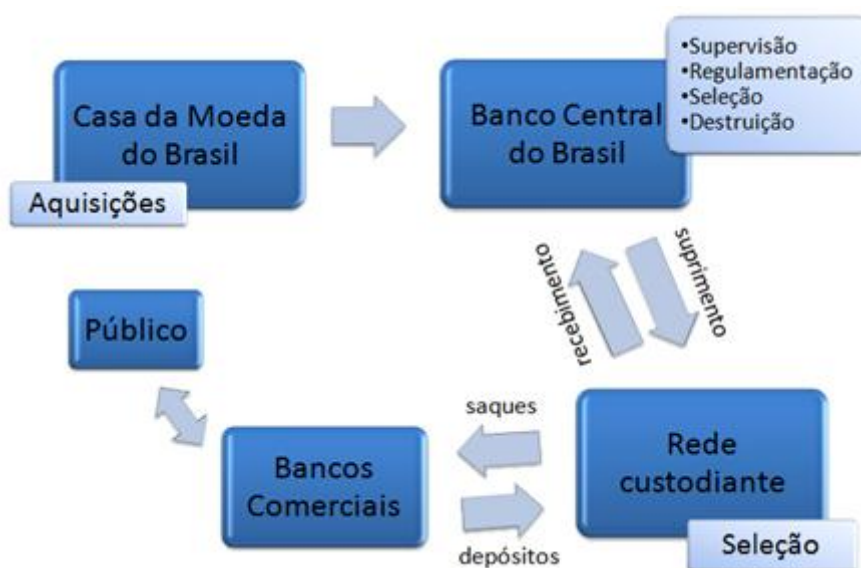
A celulose utilizada para a fabricação do papel moeda é composta por uma mistura de fibras, que por questão de segurança é mantida em sigilo. Por se tratar de um papel que exige alta qualidade, sabe-se que a presença tanto de fibras de eucalipto como de pinus é indispensável, podendo conter também fibras de algodão (HOFMANN-GATTI et al., 1996), pois estas possuem um alto teor de celulose e suas fibras proporcionam alta resistência para a fabricação de papéis especiais (FONSECA, 2005).

Tendo em vista que as fibras virgens utilizadas para fazer o papel moeda são de alta resistência, um papel reciclado a partir dessa matéria-prima apesar de conter fibras celulósicas secundárias, tem o potencial de disponibilizar um produto que conserve as características desejadas na indústria papelreira, mesmo apresentando perdas das propriedades de resistências (HOFMANN-GATTI et al., 1996). A perda da resistência das fibras recicladas ocorre com o passar dos ciclos de reciclagem, em média de cinco a seis vezes (TONON, 2006).

As cédulas a serem recicladas são as retiradas de circulação devido a manchas, sujeira, desfiguração, desgaste ou desfragmentação; com marcas rabiscos, símbolos, desenhos ou quaisquer caracteres estranhos; cortes ou rasgos em suas bordas ou interior; chamuscadas ou danificadas por ação de líquidos, agentes químicos ou explosivos etc; e que são classificadas de acordo com a Carta-circular 3.235, de 17 de maio de 2006 e a Carta-circular 3.373, de 21 de janeiro de 2009 emitidas pelo Banco Central do Brasil (BACEN, 2013).

A produção de dinheiro compete de forma exclusiva a uma empresa pública, a Casa da Moeda do Brasil (CMB) (BACEN, 2013) que conta com a empresa Arjowiggins desde 1977 para o fornecimento de toda a demanda de celulose para a fabricação do papel moeda (OLIVEIRA, 1997).

Em janeiro de 2013, o total de cédulas em circulação era de 5,41 bilhões. Destas, cerca de 2,16 bilhões de notas foram descartadas durante o ano de 2012. O Banco Central é o responsável pelo gerenciamento do ciclo do numerário (Figura 1). Este ciclo se inicia pela aquisição e retirada do dinheiro da Casa da Moeda, sendo posteriormente armazenado nas representações do Banco Central e distribuído ao único custodiante, o Banco do Brasil. Este por sua vez faz o atendimento aos bancos comerciais e seleciona o numerário que não está mais em condições de circular, devolvendo ao Banco Central, responsável por sua seleção e destruição (BACEN, 2013).



*Adaptado do BACEN (2013)

FIGURA 1. Ciclo do numerário administrado pelo BACEN.

Dentro da estrutura do Banco Central, essas atribuições são exercidas pelo Departamento do Meio Circulante (MECIR), sediado na cidade do Rio de Janeiro, com Gerências Técnicas em nove capitais do País: Belém, Belo Horizonte, Brasília, Curitiba, Fortaleza, Porto Alegre, Recife, Salvador e São

Paulo. A distribuição e o recolhimento de dinheiro nas demais regiões são realizados pelo Banco do Brasil (BACEN, 2013).

Atualmente, o BACEN desenvolve projetos pilotos de reciclagem do papel moeda em parceria com a Universidade de Brasília (UnB) e com a Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA). O trabalho com a UnB visa incentivar a reciclagem do papel moeda para a produção de papel, inserindo-o novamente no ciclo da produção de celulose e papel. O papel moeda retirado de circulação é reciclado a partir da tecnologia desenvolvida na Patente nº PI96055081, onde as fibras são disponibilizadas para a formação de novos papéis reciclados. A meta é aumentar a produção de objetos decorativos e papelaria que já são disponibilizados a partir do seu papel produzido (HOFMANN-GATTI et al., 1996, HOFMANN-GATTI, 2007).

O projeto “Utilização de Cédulas Trituradas na Produção de Composto Orgânico” desenvolvido com a UFRA tem o objetivo de incentivar a agricultura familiar. O dinheiro que sai de circulação é transformado em adubo, com 11 toneladas de papel moeda é possível produzir 17 toneladas de adubo. O composto orgânico é produzido com até 10% de confetes de papel moeda em sua composição. A meta é fornecer o composto aos pequenos produtores rurais da região (MUNIZ, 2011; TAVARES & COSTA, 2007). Apesar do papel moeda não ser tratado para a retirada dos materiais proibitivos antes de ser agregado ao composto orgânico citado, o método de reciclagem do papel moeda é uma alternativa viável encontrada em outros projetos, tais como os que fazem uso de notas antigas em telhas, aglomerados, artigos de papelaria, material de embalagem e obras de arte nos Estados Unidos (SIMS, 1994).

4.1.1. Características do Papel Reciclado

O mercado de reciclagem cresce a cada ano no país. O Brasil é o 12º maior reciclador mundial de papéis usados e teve uma taxa de recuperação em 2012 de 45,5% dos 48,6kg per capita de papel consumido no país (BRACELPA, 2013).

A reciclagem é o aproveitamento das fibras celulósicas de papéis usados e aparas para a produção de novos papéis. Qualquer tipo de papel usado pode

ser aproveitado. Tecnicamente, as fibras nele contidas poderão vir a substituir matérias-primas fibrosas virgens, como pastas químicas, semiquímicas ou mecânicas (IPT,1988b; MACEDO & VALENÇA, 1995; FIALHO, 1996; LAYRARGUES, 2002).

A reciclagem de papéis é uma atividade que vem ao longo dos anos atingindo importância mundial, tanto no aspecto econômico quanto ecológico. A necessidade de se utilizar matérias primas alternativas e mais baratas além da problemática de descarte do lixo tem gerado oportunidades à intensificação do uso de materiais recicláveis (ESCANDOLHERO, 2000; SILVA & OLIVEIRA, 2000; NASCIMENTO et al., 2009).

O lixo que a sociedade moderna produz é cada vez mais sofisticado e crescente, o seu grande volume e o seu descarte inadequado levaram ao desenvolvimento de práticas sustentáveis (LAYRARGUES, 2002). Atualmente o montante descartado pelo BACEN é depositado em lixões ou incinerado (BECKER, 2012), prática que entra em desacordo com a Lei 12.305/2010, que trata da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

De acordo com essa lei o planejamento da gestão dos resíduos emitidos tanto pelas empresas como pela comunidade, deve seguir as seguintes prioridades de ações: primeiro, a não geração do resíduo, caso não seja possível, o segundo passo é a redução da produção deste lixo, em seguida deve-se adotar métodos de reutilização e reciclagem, e, por fim, quando estes não puderem mais ser reaproveitados, devem-se tratar os resíduos sólidos e em sequência dar a disposição final adequada dos rejeitos, como por exemplo, a deposição em aterros sanitários (BRASIL, 2010).

Os benefícios proporcionados pela reciclagem somam-se à contribuição ambiental das florestas plantadas, que são a principal fonte de fibras para o setor de celulose e papel. Vários autores já listaram os proveitos ambientais das florestas plantadas (RODRIGUEZ, 1998; POGGIANI et al., 1998; FONTES et al., 2003; VALVERDE et al., 2004; CARVALHO et al., 2005; GARLIP, 2005; LINS et al., 2006; SOARES et al., 2010; BRACELPA, 2013), tais como a não competição com a agricultura tradicional, a restauração de terras degradadas, a conservação do solo, a proteção da biodiversidade e a proteção dos recursos hídricos. À medida que o mercado de papéis reciclados cresce, evidenciam-se

também suas vantagens para a diminuição do impacto ambiental, a partir da diminuição dos custos com o destino final dos resíduos por meio da redução do volume depositado em aterros sanitários das aparas descartadas pela indústria, a diminuição do consumo de matérias-primas virgens, além da economia de energia, água e recursos naturais, passando pela criação de postos trabalhos que favorece o crescimento do setor de reciclagem (MACEDO & VALENÇA, 1995; FIALHO, 1996; ESCANDOLHERO, 2000).

Assim como em outros papéis obtidos a partir de fibras virgens, também é necessário garantir a qualidade do papel reciclado. Para tanto, é preciso compreender a variabilidade das propriedades físicas e mecânicas deste papel após o processo de reciclagem (MARTON et al., 1993; NAZHAD, 1994; HUBBE et al., 2007).

A cada ciclo de reciclagem ocorre uma perda do potencial de ligação entre as fibras, reduzindo assim as propriedades mecânicas do papel fabricado. Uma fibra celulósica pode ser reciclada, em média, entre quatro a seis vezes, após perde a capacidade de entrelaçamento das fibras (IPT, 1988b; NAZHAD, 1994; TONON, 2006). Isso implica no enrijecimento das fibras e a sua consequente perda de plasticidade e flexibilidade, que ocorre devido à redução da capacidade de expansão ou dilatação da fibra, depois de transformada em papel. A capacidade de expansão é a principal característica da fibra responsável pela característica de resistência do papel, e é um dos determinantes do potencial de reciclagem do papel (NAZHAD, 1994).

Os efeitos da reciclagem mais comuns são a diminuição do comprimento das fibras, redução da resistência à ruptura e à dobra, aumento da resistência ao rasgo, da dureza (rigidez), do coeficiente de dispersão, da opacidade e da permeabilidade ao ar, e de maneira menos pronunciada a diminuição da densidade aparente e da elasticidade (LUNDBERG & de RUVO, 1978; MARTON et al., 1993; NAZHAD, 1994; TYRVÄINEN, 1995; GARG & SINGH, 2006; HUBBE et al., 2007).

Em alguns usos não é possível a utilização de papel reciclado, sendo então indispensável a utilização de fibras virgens, que apresentam produtos de características e qualidade superiores. Assim a fibra virgem será sempre a

base da indústria de celulose e papel, uma vez que o ciclo infinito da reciclagem é impraticável (NAZHAD, 1994).

4.2. POLPAÇÃO TERMOMECÂNICA

A madeira é uma matéria-prima formada de fibras (polissacarídeos) em múltiplas camadas, ligadas entre si por forças interfibrilares e pela lignina que age como ligante (FOELKEL & BARRICHELO, 1975; IPT, 1988a; ZOBEL & VAN BUIJTENEN, 1989; KLOCK et al., 2005; ROWELL, 2005). As fibras da madeira são individualizadas para se obter a pasta celulósica utilizada para fazer papel. Segundo o IPT (1988a) para se separar as fibras, unidas por forças coesivas intermoleculares, é necessário despende certa quantidade de energia. Sendo assim, o processo de polpação, que é definido como o processo de separação das fibras da madeira, pode ser classificado em três tipos, dependendo do tipo e da quantidade de energia aplicada à madeira: processo mecânico, térmico e químico.

Nos métodos mecânicos, intensas forças de cisalhamento rompem as ligações entre as fibras obtendo-se um rendimento elevado a baixo custo, resultando numa pasta de baixa qualidade, composta de feixes de fibras e fibras danificadas. Nos processos termomecânicos e semiquímicos, observa-se alguma remoção de lignina e de hemiceluloses. Em consequência da menor influência mecânica, as fibras apresentam-se melhor separadas e menos danificadas do que no processo mecânico convencional. Quando se utilizam somente reagentes químicos e condições de processo mais enérgicas (processo químico), ocorre uma alta taxa de deslignificação e de solubilização de hemiceluloses, acompanhada de alguma degradação da celulose, o que explica o baixo rendimento do processo, mas que disponibiliza uma polpa de alta qualidade para a indústria de celulose e papel (IPT, 1988a).

A polpação termomecânica, método de individualização das fibras adotado neste estudo, surgiu em meados de 1932, entretanto o interesse comercial cresceu apenas na década de 70. O processo consiste na individualização das fibras da madeira por meio de sua moagem na presença de água e vapor, finalizando com a realização do refino. O uso do tratamento térmico para o amolecimento da lignina antes da refinação resultou numa

proporção maior de fibras longas e menos quebradas, obtendo-se assim polpas mais fortes. Todavia, ao contrário de polpas químicas, a polpa termomecânica é composta parcialmente de fibras inteiras (30-40%), pois grande parte das fibras é quebrada pelo processo mecânico (TYRVÄINEN, 1995).

A pasta é refinada para melhorar a resistência e a qualidade da polpa produzida (OJALA, 1980). Se uma pasta celulósica for dispersa em água o suficiente para separar as fibras umas das outras, e se a suspensão resultante for diretamente para a máquina de papel, será obtido um papel de baixa qualidade. Isto é explicado por uma série de razões: primeiro, a suspensão terá um desaguamento na tela muito rápido, o que impedirá que haja formação de uma folha uniforme; segundo haverá formação de flóculos (fibras aglomeradas), antes mesmo que a suspensão atinja a tela; terceiro, as fibras não serão suficientemente flexíveis e fibriladas para que tenham resistência capaz de permitir a passagem da folha, entre as diversas seções da máquina de papel, sem que ela se quebre; finalmente a folha resultante terá baixa resistência (IPT, 1988b).

Apesar das polpações químicas disponibilizarem fibras de melhor qualidade, o processo termomecânico é muito utilizado para se produzir pastas para o uso em papéis de impressão de livros, escrita e desenho, catálogos, revistas, papéis absorventes, papelão; e, além disso, proporcionam polpas de maiores rendimentos, embora ocorra a diminuição da resistência da polpa produzida (IPT, 1988a).

Entretanto, quando a matéria-prima não se trata de madeira, o uso de processos que promovam a individualização das fibras sem que haja uma perda do rendimento, são mais desejáveis. Por exemplo, para a produção de polpas celulósicas a partir de plantas não-madeireiras e em resíduos agrícolas em geral, as polpações recomendadas são a mecânica, termomecânica e o processo cal (CaO), como no trabalho de Blanco Rojas (1996) que utilizou o processo termomecânico para a polpação do engaço de cana. O método consistiu na eliminação de materiais não fibrosos utilizando o cozimento em água por 3 horas à 98°C, realizando assim a separação física dos materiais indesejados. Numa segunda etapa, o material foi refinado mecanicamente produzindo a polpa celulósica.

Os estudos de polpação são importantes, pois fornecem parâmetros que auxiliam o processo de produção da polpa, seja qual for o tipo de matéria-prima utilizada (madeira ou não), a fim de se obter a fibra com a melhor qualidade possível (TYRVÄINEN, 1995).

4.2.1. Licor de cozimento

O mecanismo de deslignificação para a produção de polpa celulósica é facilitada quanto maior for a impregnação do licor de cozimento através da difusão dos reagentes para o interior da matéria-prima (MIRANDA & BARRICHELO, 1991; MCDONOUGH, 1998).

O sistema de controle do processo de polpação através da análise do licor de cozimento proporciona ganhos em relação à qualidade da polpa produzida, fornecendo informações precisas sobre o processo (PAULONIS, 1990). Além disso, uma análise do licor de cozimento deve ser realizada para gerenciar e classificar os efluentes gerados pelo processo de polpação, atentando-se aos parâmetros dispostos na legislação ambiental aplicável em cada seguimento da atividade industrial (BASSOI et al., 1990).

A Resolução nº430, de 13 de maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), dispõe sobre as condições, parâmetros, padrões e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes em corpos de água receptores. Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução, tais como o pH entre 5 a 9; temperatura inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura; os valores máximos dos parâmetros orgânicos e inorgânicos, tais como arsênio, bário, boro, cádmio, chumbo, cianeto, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, mercúrio, níquel, nitrogênio, prata, selênio e zinco, devem seguir o limite listado por esta resolução (CONAMA, 2011).

Dentre os contaminantes químicos presentes nos efluentes destacam-se os metais pesados, que são metais classificados como poluentes, englobando um grupo muito heterogêneo de metais, semi-metais e mesmo não metais

como o selênio. Na lista dos metais pesados os mais frequentes são cobre, ferro, manganês, molibdênio, zinco, cobalto, níquel, vanádio, alumínio, prata, cádmio, cromo, mercúrio e chumbo (ALLOWAY, 1995).

Nesse contexto, a utilização de ensaios de toxicidade constitui uma eficiente alternativa às ações preventivas e corretivas de controle de poluição das águas por compostos químicos tóxicos (NIETO, 2000).

4.3. QUALIDADE DA POLPA

A qualidade e o rendimento das polpas celulósicas dependem do processo empregado para a separação das fibras da madeira. Sabe-se que o processo mecânico proporciona um maior rendimento e uma menor qualidade da polpa, já no processo químico, as polpas são disponibilizadas com uma alta qualidade, porém com um baixo rendimento (IPT, 1988a).

Para se determinar a qualidade de uma polpa é necessário que se avalie todas as características e propriedades que afetam o rendimento dos produtos finais e sua adequação para as aplicações pretendidas. A qualidade final dos produtos pode ser afetada por características da madeira, como densidade, rigidez, estabilidade, presença de nós, cerne, bolsas de resina, teor de lignina, teor de extrativos e outros (WEST et al., 1928).

Para a indústria de celulose e papel, uma avaliação adequada das características físicas e químicas fornece indicações bastante precisas acerca da impregnação dos cavacos, do rendimento do processo e das características de resistências físico-mecânicas da polpa (QUEIROZ et al., 2004).

As propriedades morfológicas da madeira são geralmente consideradas como sendo o mais importante fator que caracteriza as propriedades das polpas mecânicas e a qualidade do papel produzido (TYRVÄINEN, 1995). Além disso, os estudos anatômicos possibilitam estabelecer prováveis relações com as características gerais da madeira, resistência mecânica, trabalhabilidade e permeabilidade (BROWNING, 1963).

A morfologia das fibras (forma e tamanho) e a estrutura de sua parede influenciam diretamente na flexibilidade, plasticidade e resistência das fibras obtidas por processos mecânicos, podendo influenciar também nas ligações entre fibras e em outras propriedades físicas do produto final. Assim, as

estruturas físicas e químicas das fibras são utilizadas para prever as propriedades da polpa mecânica (VEAL & JACKSON, 1985).

O conhecimento da composição química da matéria-prima destinada à produção de celulose é de grande valia. Os teores de lignina e extrativos são considerados características químicas fundamentais, uma vez que os dados fornecerão condições para que se estabeleçam os parâmetros do processo de polpação, como o consumo de reagentes, rendimento em celulose, quantidade de sólidos gerados no licor negro e o potencial de produção industrial (SANTOS, 2000).

Nos processos de polpação os principais constituintes químicos da parede celular (celulose, hemicelulose e lignina), começam a amolecer em diferentes temperaturas (FENGEL & WEGNER, 1989). As hemiceluloses, principal substância intercelular entre as microfibrilas, começam a amolecer entre 50-60°C, enquanto que a lignina que liga as paredes das fibras umas às outras amolece entre 90-100°C. A celulose, que transmite a força axial para a fibra permanece inalterada até 230-240°C (GORING, 1963).

Nos processos termomecânicos também é necessário que se garanta a distribuição uniforme da temperatura e do vapor no processo de individualização das fibras, além do cuidado com o perfil de todos os ciclos de refinação (TYRVÄINEN, 1995).

A refinação modifica as características estruturais das fibras e é importante para a qualidade final do papel produzido (BUSNARDO, 1990). As fibras submetidas ao processo de refino são esmagadas, desfibriladas e cortadas. Essas modificações efetuadas dentro de limites proporcionam aumento na área de contato entre as fibras, e conseqüentemente aumenta a resistência da celulose (MILANEZ et al., 1982).

Contudo, os estudos sobre a qualidade da polpa buscam aprofundar a compreensão do efeito das propriedades da madeira e das condições do processo sobre a qualidade da polpa celulósica além de fornecer subsídios à indústria para a definição de estratégias de processamento ou ainda para a compreensão do comportamento das variáveis do processo produtivo sob condições específicas (COSTA, 2011).

4.4. QUALIDADE DO PAPEL

Todo processo de fabricação de papel passa pelas mesmas etapas: formação, que consiste na aplicação da polpa celulósica sobre uma tela; drenagem, que é a remoção inicial da água através de escoamento por gravidade ou uma diferença de pressão; consolidação, resultado da compactação da polpa celulósica; e secagem, através da remoção da água pelo contato com superfícies aquecidas (BIERMANN, 1996).

Para assegurar a conformidade e a qualidade de cada tipo de papel é necessário usar métodos de ensaio e de análise, que devem ser precisos e exatos, sendo essencial ter simplicidade e rapidez de execução. A maior parte dos ensaios é realizada em condições específicas, usando equipamentos apropriados que servem para a medição de características dimensionais, de resistência, de propriedades ópticas, de superfície e outras características do produto; com o intuito de se qualificar o papel produzido por determinado processo de polpação (IPT, 1988b).

Todo procedimento de teste é caracterizado pela perceptividade (ou nitidez da leitura do aparelho), precisão e acurácia. Ou seja, toda medição tem uma capacidade limitada de perceber e mostrar uma pequena variação na propriedade avaliada, exibe alguma variação nos resultados quando o teste é repetido (nas exatas mesmas condições) e apresenta uma certa diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro (ou real). A aproximação do valor medido ao valor real é obtida com a calibração do aparelho e escolha de uma amostra representativa, já a precisão do teste pode ser expressa com o uso da estatística em termos de desvio padrão ou intervalo de confiança (SMOOK, 1992).

No âmbito do papel, distinguem-se propriedades ou características de natureza mecânica, óptica, elétrica, química e estrutural. As propriedades mecânicas incluem resistência à tração e rigidez. As propriedades ópticas incluem, entre outras, opacidade e permeância ao ar. As propriedades químicas incluem pH, umidade, solubilidade em soda e número de cobre. As propriedades elétricas incluem rigidez dielétrica e condutividade. As

propriedades estruturais ou físicas incluem espessura, gramatura, volume específico e porosidade (CASEY, 1961).

O termo propriedades de resistência é geralmente usado quando se refere aos atributos mecânicos do papel. Estas propriedades determinam a durabilidade e a resistência do papel às forças aplicadas durante os processos de fabricação, conversão e uso final (LIBBY, 1962).

Vários ensaios podem ser realizados no papel como: resistência à tração, resistência ao arrebentamento e resistência ao rasgo. Nenhum destes ensaios é uma medida de grandeza fundamental, mas uma combinação de vários fatores, como flexibilidade, ligações de fibras e resistência da fibra. Tais fatores dependem, entre outros, do tipo de fibra, do seu comprimento e espessura, de suas flexibilidades individuais, do número de ligações entre fibras, da resistência das ligações individuais, da gramatura do papel, da densidade aparente e da umidade (LIBBY, 1962).

A resistência ao rasgo é a força perpendicular ao plano do papel necessária para rasgar uma ou mais folhas de papel através de uma distância específica (ZANUNCIO et al., 2011). O ensaio mais frequentemente encontrado para avaliar a resistência ao rasgo é o Elmendorf, criado em 1920 e que até hoje usa um equipamento com características definidas pelo inventor que deu nome ao teste. Mede o trabalho mecânico requerido para continuar um rasgo, já iniciado, até uma distância pré-determinada (SCOTT et al., 1995).

Dois fatores determinam a resistência ao rasgo: a força necessária para arrancar a fibra da estrutura e a força para romper a própria fibra. Isto torna essa propriedade diretamente correlacionada ao comprimento médio das fibras (BUGAJER e KUAN, 1980).

A resistência ao arrebentamento, também conhecida por estouro, é definida como a pressão necessária para produzir o arrebentamento do material, ao se aplicar uma pressão uniformemente crescente, transmitida por um diafragma elástico, de área circular, igual 962mm². Polpas com menores teores de finos e maiores comprimentos de fibras, em geral, geram papéis com maior resistência ao estouro (NASCIMENTO et al., 2009).

A resistência ao arrebentamento é testada por um aparelho que prende o corpo-de-prova entre dois anéis e submete o seu interior à pressão por um

dos lados criando uma deformação aproximadamente esférica até a ruptura. A resistência ao arrebentamento e à tração são altamente correlacionadas, permitindo que algumas empresas prefiram o teste de arrebentamento pela sua simplicidade. É realizado com o aparelho tipo Mullen que data dos anos 1890 (SCOTT et al., 1995).

A resistência à tração é a força máxima de tração por unidade de largura que o papel ou cartão suporta antes de se romper, sob condições definidas. É à força de tensão direta, necessária para arrebentar o papel, quando aplicada longitudinalmente ou transversalmente. As ligações interfibrilares ocorridas na formação do papel serão fundamentais para se discutir essa propriedade (NASCIMENTO et al., 2009). Resistência à tração é frequentemente reconhecida como uma propriedade fundamental na indústria do papel. Observando atentamente, ela se revela uma propriedade complexa, envolvendo forças de tração, cisalhamento e flexão agindo internamente sobre as fibras (SCOTT et al., 1995).

As propriedades físicas afetam as propriedades mecânicas e ópticas do papel e são afetadas por muitos fatores, tais como a composição fibrosa, o grau de ligação das fibras, o grau de refino, a presença de muitos materiais não fibrosos que preenchem os espaços vazios e a calandragem (IPT, 1988b; CIT, 2007; BASTIANELLO et al., 2009).

A gramatura, que pode ser descrita como a massa do papel expressa em gramas por metro quadrado (g m^{-2}), juntamente com o peso da folha são as mais importantes características tanto do ponto de vista da fabricação como do uso do papel. A gramatura exerce grande influência sobre as propriedades de resistência do papel e para reduzi-la, sobre os valores observados, estes são expressos na forma de índices. O valor da resistência é dividido pela gramatura gerando assim índices como os de resistência ao rasgo, ao arrebentamento à tração e de comprimento de auto-ruptura (IPT, 1988b, SMOOK, 1992; SCOTT et al., 1995; BIERMANN, 1996).

A espessura de uma folha é um dos principais fatores para definir a sua aplicação. É definida como a distância entre as duas principais superfícies do papel, medida sob pressão constante ($50 \pm 2\text{kPa}$) e expressa em milímetros. Espessuras podem variar de 0,0076mm (para capacitores) a 2mm (para

papelão). Para alguns papéis a uniformidade de espessura ao longo da folha é ainda mais importante. A umidade da folha pode interferir nos resultados, sendo importante o seu prévio acondicionamento (SCOTT et al., 1995).

A densidade aparente é definida como o quociente entre a gramatura e a espessura do papel e é expressa em gramas por centímetro cúbico (g cm^{-3}). O volume aparente se apresenta como a razão entre a espessura e a gramatura do papel e é expresso em centímetros cúbicos por grama ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$). Algumas pesquisas indicam que a resistência à tração e ao arrebitamento crescem com o aumento da densidade aparente do papel. A resistência ao rasgo, a opacidade e a permeância ao ar, decrescem com o aumento dela (SCOTT et al., 1995).

O volume específico é definido como o volume, em centímetros cúbicos ocupados por um grama de papel. O valor recíproco do volume específico é a densidade específica. Ambos são frequentemente denominados de aparente, por incluir os espaços do papel preenchidos por ar (IPT, 1988b).

A porosidade ou permeância ao ar é definida como sendo a propriedade que permite a passagem de ar através do papel sob uma diferença de pressão. É uma propriedade estrutural do papel que depende do número, tamanho, formato e distribuição dos poros no papel. A permeância ao ar não deve ser confundida com a porosidade, que é a razão entre o volume de poros e o volume total do papel (IPT, 1988b).

As medições para avaliar a permeância ao ar podem ser feitas por diversos aparelhos; os mais conhecidos incluem: Schopper, Bendtsen, Sheffield e Gurley. Enquanto os três primeiros permitem determinar o volume de ar que atravessa a superfície do papel, o porosímetro de Gurley mede o tempo (em segundos) necessário para que um volume de ar passe através de uma determinada superfície do papel (IPT, 1988b).

As propriedades do papel são resultantes de interações de um grande número de fatores, tais como as fibras ou a mistura de fibras usadas, matérias-primas não fibrosas, o processo de obtenção e branqueamento da pasta celulósica, o tratamento mecânico dado às fibras na preparação da polpa e o processo de formação, prensagem e secagem da folha. Estas variáveis são

ajustadas a fim de se obter o melhor produto com as propriedades desejadas (CASEY, 1961).

Além dos fatores apresentados, materiais proibitivos, tais como látex, adesivos, resinas, parafinas ou impregnados com substâncias impermeáveis à umidade, como no caso do papel moeda, podem causar dificuldades para que as fibras celulósicas das aparas e dos papéis velhos possam ser aproveitadas na fabricação de novos papéis. Para tanto, devem ser eliminados para que não afetem a qualidade do papel reciclado produzido a partir de suas aparas (IPT,1988b).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1.MATÉRIA-PRIMA

Para a realização deste trabalho foi utilizado o papel moeda retirado de circulação pelo Banco Central do Brasil (BACEN) do Distrito Federal. Por motivos de segurança, já que se trata de dinheiro, o material foi cedido picotado, em formato de confetes com comprimento entre 0,3cm e 0,8cm e com os diferentes tipos de notas existentes misturadas (cédulas de R\$ 2,00; R\$5,00; R\$ 10,00; R\$ 20,00; R\$ 50,00 e R\$ 100,00). Para auxiliar no transporte, o papel moeda foi prensado e disponibilizado em forma de bloco (Figura 2) a fim de se diminuir o volume de material a ser transportado. Entretanto para a realização dos testes deste trabalho, o papel moeda disponibilizado em bloco foi desagregado de forma manual para que seus confetes se separassem mais, aumentando assim a sua superfície de contato, o que auxilia na ação do licor de cozimento.



FIGURA 2. Papel moeda picotado em bloco.

O papel moeda foi acondicionado em sacos de polietileno e encaminhado ao Laboratório de Química, Celulose e Energia da Universidade de São Paulo – USP/ESALQ em Piracicaba – SP para realização das análises de propriedades básicas (teor seco, densidade aparente e cinzas) e produção de polpa.

5.2. TEOR SECO

O teor seco do papel moeda seguiu as prerrogativas da norma TAPPI T258 om-11. Cinco amostras de aproximadamente 20g de papel moeda foram colocadas em placas de petri previamente pesadas e levadas para estufa onde permaneceram até atingir a massa constante em temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$. O teor seco foi obtido utilizando a Equação 1:

$$a. s. = \frac{P_s}{P_u} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

$a.s.$ = teor absolutamente seco, %;

P_u = peso úmido do papel moeda, g;

P_s = peso seco do papel moeda, g.

5.3. DENSIDADE APARENTE DA MATÉRIA-PRIMA

A densidade aparente dos confetes e do bloco do papel moeda foi determinada com a utilização de 5 amostras de aproximadamente 200g para os confetes e de 600g para o bloco, conforme descrito por Rezende et al. (1988), de acordo com a Equação 2:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ap}}{V_{ap}} \quad (2)$$

Onde:

ρ_{ap} = densidade aparente, %;

m_{ap} = massa seca de papel moeda, g;

V_{ap} = volume aparente de papel moeda, g.

5.4. CINZAS

A análise de cinzas foi determinada seguindo a norma TAPPI T413 om-02 utilizando 5 repetições, sendo o teor de cinzas calculado por diferença, de acordo com a seguinte equação:

$$Cinzas (\%) = \frac{A}{B} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

A= massa de cinzas;

B= massa seca do papel moeda.

5.5. PROCESSO DE INDIVIDUALIZAÇÃO DAS FIBRAS

Para o processo de individualização das fibras foi utilizado o dispersor NETZSCH (Figura 3) com dispersão a quente à 80°C, com um vaso de capacidade de 20 litros, o sistema foi aberto sem o uso de autoclave. Em cada tratamento foi utilizado 0,5kg a.s. (absolutamente seco) de papel moeda, variando-se a carga de dispersante químico e o tempo em horas. O dispersante químico, Aldin 04 PFM, é composto de matérias ativas base de álcoois e metasilicatos em meio aquoso e é destinado a umidificação e desagregação de

papel, conforme descrito pelo fabricante Lotus - Química e Lubrificação Industrial.

Ao final de cada tratamento foram realizados refinamentos em série (três passagens pelo refinador) utilizando o refinador de discos simples com um disco estacionário e um rotativo da marca Regmed (Figura 4). A Tabela 1 mostra as condições empregadas no trabalho.



FIGURA 3. Dispensor NETZSCH.



FIGURA 4. Refinador de discos da Regmed.

TABELA 1. Condições de tratamento para o processo de individualização das fibras do papel moeda.

Parâmetro	Condições
Temperatura máxima, °C	80
Consistência, %	5
pH	7-8
Cargas de dispersante químico, %	0, 1, 2, 4 e 8
Tempo, horas	4, 8, 16 e 32
Refino	Em série
Repetições	3

5.6. PARÂMETROS DETERMINADOS NA POLPA

Ao final de cada tratamento, as polpas refinadas foram desagregadas em hidrapulper laboratorial, depuradas em depurador laboratorial com fendas de 0,2mm, centrifugadas e armazenadas em sacos de polietileno para se efetuar as análises dos parâmetros descritos na Tabela 2. Os rejeitos foram coletados e secos em estufa $105 \pm 3^\circ\text{C}$ até massa constante.

TABELA 2. Parâmetros determinados na análise da polpa ao final de cada tratamento.

Parâmetro	Norma
Rendimento bruto	Relação entre massa a.s. de celulose e massa a.s. da matéria-prima
Rendimento depurado	Relação entre massa a.s. de celulose depurada e massa a.s. da matéria-prima
Teor de rejeitos	Relação entre massa a.s. de rejeitos (material retido em peneira com fenda de 0,2mm de depurador laboratorial) e massa a.s. da matéria-prima
Viscosidade, cP	Tappi Methods - T230 om-94

*a.s.= absolutamente seco.

5.7. PARÂMETROS DETERMINADOS NO LICOR

O pH do licor foi determinado nos estágios inicial, final e durante os tratamentos seguindo a variação exponencial do tempo (4, 8, 16 e 32 horas) e conforme as diretrizes da norma TAPPI T625 om-85.

Para a análise dos metais pesados residuais foram coletados, ao final de cada tratamento, 20ml de licor, acondicionados em recipientes de vidro e mantidos em geladeira à $\pm 8^{\circ}\text{C}$ para posterior análise no Laboratório de Materiais e Combustíveis do Instituto de Química da UnB (Tabela 3).

TABELA 3. Parâmetros determinados na análise dos licores coletados ao longo do processo de individualização das fibras.

Parâmetro	Método
pH do licor	Tappi Methods - T625 om-85
Metais pesados residuais	ICP-OES - Espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente

As dosagens de alumínio, boro, bário, berílio, cálcio, cádmio, cobalto, cromo, cobre, ferro, potássio, lítio, magnésio, manganês, sódio, níquel, fósforo, chumbo, enxofre, silício, estanho, tálio, zinco e zircônio foram realizadas por espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), num espectrofotômetro iCAP 6000 Series da Thermo Scientific (Figura 5). O método consistiu na diluição de 0,5ml de amostra do licor em 5ml de água deionizada em tubos de ensaio para a determinação da concentração de cada metal em ppm, realizada concomitantemente com as análises dos brancos. Para a discussão dos resultados foi considerado 1ppm equivalente a 1mg L^{-1} , conforme WILHELM et al. (1991).



FIGURA 5. Espectrofotômetro iCAP 6000 Series da Thermo Scientific.

5.8. MORFOLOGIA DAS FIBRAS DA POLPA DO PAPEL MOEDA

Para a caracterização morfológica das fibras da polpa do papel moeda foram confeccionadas lâminas no Laboratório de Tecnologia da Madeira do Departamento de Engenharia Florestal da UnB. O material, depois de dissociado, foi submetido à coloração com safranina a 1% em solução alcoólica e montada com glicerina. As mensurações dos elementos celulares individuais foram feitas com o auxílio de microscópio óptico Leica DM 750, com módulo de câmera digital Leica ICC50, com foco de 4x/0,10 para a obtenção do comprimento das fibras e de 40x/0,65 para o diâmetro do lume, utilizando o software Las EZ V1.7.0 para o dimensionamento desses parâmetros.

Com o intuito de caracterizar a polpa produzida, os resultados obtidos representam a média da mensuração de 100 fibras medidas em 10 lâminas da amostra da polpa após o refino sem a presença do dispersante químico. Os parâmetros considerados no estudo das fibras foram o comprimento (C), largura (L), diâmetro do lume (D) e espessura da parede (E), calculada como a metade da diferença entre a largura da fibra e o diâmetro do lume. Para cada uma das dimensões foram determinados os valores médio, máximo, mínimo, desvio-padrão e coeficiente de variação.

5.9. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DAS POLPAS

A análise das propriedades físicas e mecânicas das pastas foi realizada no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, no Laboratório de Papel e Celulose.

As amostras das polpas sem a presença do dispersante químico nos quatro tempos foram submetidas à desagregação, resultando em pastas denominadas "ponto zero" (sem refino). Em seguida foram submetidas ao processo de refino em refinador PFI. O número de revoluções foram realizadas tantos pontos quanto possível, dependendo da quantidade disponível de cada amostra para os testes. O chamado "grau de refino" foi determinado pela resistência à drenagem das pastas, pelo aparelho Schopper Riegler.

A partir destas pastas celulósicas foram formadas folhas em laboratório. As folhas foram submetidas aos ensaios descritos na Tabela 4.

TABELA 4. Refino e ensaios físicos de folhas formadas em laboratório.

Parâmetro	Norma
Refinação no PFI	ABNT NBR 14345
Resistência à drenagem, pelo aparelho Schopper Riegler FF 024 (°SR)	ABNT NBR 14031:2004
Formação de Folhas	ABNT NBR ISO 5269-1:2006
Gramatura	ABNT NBR NM ISO 536:2000
Espessura, densidade e volume específico	ABNT NBR NM ISO 534:2006
Resistência e índice de tração	ABNT NBR NM-ISO 1924-2:2012
Resistência e índice de rasgo	ABNT NBR NM ISO 1974:2001
Resistência e índice de arrebentamento	ABNT NBR NM ISO 2758:2007
Permeância ao ar, Gurley PGH (EF 015)	ABNT NBR NM ISO 5636-5:2006

5.10. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Adotou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, aplicando a análise estatística descritiva e a ANOVA para os parâmetros rendimento bruto, rendimento depurado, teor de rejeitos e viscosidade. Quando a análise de variância foi significativa, se utilizou o teste de Tukey a 5% de significância. Os dados foram analisados pelo pacote estatístico SPSS Statistics 20.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. MORFOLOGIA DAS FIBRAS DA POLPA DO PAPEL MOEDA

A partir da análise anatômica das fibras é possível caracterizar e avaliar tanto a matéria-prima destinada à produção de polpa celulósica como a polpa resultante. De acordo com FENGEL & WEGNER (1989), o conhecimento das dimensões morfológicas das fibras permite fazer correlações com as propriedades físico-mecânicas da polpa. Segundo FOELKEL (1978), as fibras são os elementos anatômicos mais importantes no processo de polpação, pois estão relacionadas com o rendimento e a qualidade da polpa celulósica.

A caracterização de fibras da polpa do papel moeda tem como principal intuito explicar possíveis perdas nas propriedades que afetam a qualidade da polpa obtida no processo. Os valores médios das fibras são apresentados na Tabela 5.

TABELA 5. Valores médios das dimensões de fibras da polpa do papel moeda.

Dimensões das Fibras	Amostragem total (100%)			Fibras Inteiras (43%)	Fibras Quebradas (57%)
	<i>Média</i>	<i>Varição</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Média</i>	<i>Média</i>
Comprimento da fibra, mm	0,93	0,51 - 1,92	0,28	1,02	0,78
Largura da fibra, µm	15,42	8,62 - 24,80	3,55	15,72	14,97
Diâmetro do lume, µm	4,98	0,75 - 8,66	1,17	5,00	4,94
Espessura da parede, µm	5,22	2,78 - 11,40	1,58	5,36	5,02

Sob o ponto de vista papelero, Fengel & Wegner (1989) relata que as fibras vegetais geralmente são classificadas como fibras longas quando possuem comprimento entre 1,50 e 5,00mm, como o pinus; e fibras curtas possuem comprimento entre 0,50 e 1,50mm, como o eucalipto. Observando-se a Tabela 5, verifica-se que o material em estudo (polpa de papel moeda) apresenta uma média de comprimento de fibra de 0,93mm. No entanto, observa-se também a presença de fibra com 1,92mm de comprimento. Tanto a largura das fibras como a espessura de suas paredes seguem esta mesma tendência, mostrando fibras que poderiam ser caracterizadas como curtas (folhosas), mas também a presença de fibras que poderiam ser classificadas como longas (coníferas), assim como citado por Hofmann-Gatti et al. (1996). Este intervalo de valores de dimensões de fibras apresentado pela matéria-prima em estudo sugere que esta celulose é formada em sua grande maioria por fibras curtas (a média do comprimento, largura e espessura de parede, aproxima-se deste tipo de fibras). Entretanto a presença de outras fibras parece acontecer, uma vez que os intervalos de valores para estes mesmos parâmetros ultrapassam os intervalos citados por Fengel & Wegner (1989). Considerando-se esta bibliografia, conforme já mencionado, sugere-se também a presença de fibras de pinus. No entanto, deve-se lembrar que outras fibras como as de bambu, sisal, bagaço de cana (IPT, 1988a), possuem dimensões, sobretudo de comprimento e largura, que contemplam valores nos intervalos encontrados neste estudo (Tabela 6).

Na intenção de melhor caracterizar o material estudado, apresenta-se na Tabela 6, valores de dimensões de fibras de diferentes espécies.

TABELA 6. Valores de dimensões de fibras de diferentes espécies e do material estudado.

Fibra	Comprimento (mm)	Largura (µm)	Espessura da Parede (µm)
Papel moeda	0,51 - 1,92	8,62 - 24,80	2,78 - 11,40
Araucária	2,00 - 5,37	23,0 - 41,2	3,25 - 18,5
<i>Pinus elliotti</i>	1,55 - 4,68	21,5 - 42,8	2,80 - 19,6
Bambu	1,16 - 6,16	7,50 - 29,2	2,75 - 13,2
Sisal	1,15 - 4,15	11,2 - 30,0	2,25 - 8,38
Eucalipto	0,70 - 1,40	11,0 - 22,2	2,00 - 8,00
Gmelina	0,72 - 1,79	16,5 - 41,2	1,25 - 5,38

Bagaço de cana	0,82 - 3,91	11,3 - 45,6	1,43 - 15,6
----------------	-------------	-------------	-------------

Fonte: Adaptado de IPT, 1988a.

Segundo Hofmann-Gatti et al. (1996), a celulose utilizada para a fabricação do papel moeda é composta por uma mistura de fibras, que por questão de segurança é mantida em sigilo. Por se tratar de um papel que exige alta qualidade, sabe-se que a presença tanto de fibras de eucalipto como de pinus é indispensável, podendo conter ainda outras fibras.

Sabe-se que a cada ciclo da reciclagem, as fibras se deterioram cada vez mais e a sua plasticidade tende a diminuir sucessivamente. Ainda observando-se a Tabela 5, o processo de reciclagem e de refino promoveu a quebra das fibras e o percentual encontrado foi de 57% de fibras quebradas. Entre as fibras inteiras (43%), 86,67% deste total, podem ser classificadas como curtas e 13,33% fibras longas.

O efeito deteriorador da reciclagem em papel se manifesta sobre a perda do potencial de ligação das fibras recicladas, isto é, a perda da flexibilidade da fibra úmida provocada pelo efeito da reciclagem, tem como consequência, uma diminuição das propriedades físico-mecânicas da polpa (NAZHAD, 1994). Ainda segundo este pesquisador, além disso, o efeito da refinação somado ao efeito deteriorador da reciclagem provoca fadiga mecânica nas fibras recicladas, ocasionando uma maior rigidez das lamelas e restringe as superfícies internas das fibras, dificultando a absorção de água pelas fibras. O resultado é a perda de inchaço, plasticidade e molhabilidade das fibras recicladas. A maior parte desta mudança tem lugar no primeiro ciclo, apesar de continuar ocorrendo nas sucessivas reciclagens.

A espessura da parede da fibra tem uma alta relação positiva com a resistência às tensões perpendiculares exercidas na fibra (FENGEL & WEGNER, 1989; WEST et al., 1928; ZOBEL & VAN BUIJTENEN, 1989). O valor médio de 5,22µm de espessura da parede de fibra do papel moeda se equivalente aos valores encontrados por Tomazello Filho (1985) para *Eucalyptus gummifera* (5,2µm, à altura de 25% do raio das amostras no sentido medula casca), *E. microcorys* (5,0µm, à 25%) e *E. pilularis* (5,3µm, à 50%). No entanto, o material em estudo também apresentou espessura de fibras de 11,40µm, como o do pinus e bambu, verificados na Tabela 6. As fibras com as

paredes mais espessas possuem maior teor relativo de celulose, podendo-se inferir uma correlação positiva entre a espessura da parede e o rendimento em produção da celulose (PAULA, 1999).

Um problema que restringe a área de reciclagem de papel é a falta de conhecimento sobre o mecanismo pelo qual a reciclagem afeta a textura e o arranjo da parede celular, provocando perdas nas propriedades das fibras recicladas (NAZHAD, 1994). Entretanto, a perda do potencial de ligação das fibras recicladas, que é o efeito deteriorador da reciclagem de papel mais expressivo, pode ser facilmente detectada na etapa de formação das folhas, quando estas deixam de formar uma rede de fibras com resistência mecânica suficiente para formar uma folha de papel.

6.2. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

O teor seco (a.s.) e a densidade aparente são parâmetros bastante diretos e simples a serem considerados para se determinar o volume da matéria-prima a ser utilizado na produção da polpa (Tabela 7). Ainda nesta Tabela encontra-se o teor de cinza tanto da matéria-prima, como da polpa com dispersante submetida aos quatro tratamentos.

TABELA 7. Propriedades básicas do papel moeda e teor de cinza da polpa na matéria-prima e nos tratamentos com dispersante.

Parâmetro	Papel moeda	
a.s., %	94,53	
densidade aparente da matéria-prima em confete, g.cm ⁻³	0,10	
densidade aparente da matéria-prima em bloco, g.cm ⁻³	2,03	
cinzas na matéria-prima, %	5,55	
	Tratamento	
	4 horas	3,45
cinzas na polpa*, %	8 horas	2,88
	16 horas	2,85
	32 horas	2,76

*Referente aos tratamentos com dispersante químico.

A compactação da matéria-prima em blocos auxilia no transporte e armazenamento da mesma. Entretanto, para se efetuar o processo de individualização das fibras, o material deve estar desagregado. Como esperado, a densidade aparente dos blocos foi superior a densidade aparente do material desagregado (confetes). Além de influir na consistência utilizada, como uma condição no processo termomecânico, a densidade aparente de $0,10\text{g cm}^{-3}$ dos confetes foi adotada a fim de se caracterizar a matéria-prima deste estudo.

O teor de cinzas refere-se ao resíduo inorgânico que permanece após a queima da matéria orgânica. A bibliografia cita valores abaixo de 1% de teor de cinzas com relação ao peso seco da madeira de pinus e eucalipto usadas na fabricação de papel (BARRICHELO & FOELKEL, 1976; ANDRADE, 2006; SEGURA, 2012). Entretanto, a matéria-prima deste estudo se trata de papel e o seu alto teor de cinzas (5,55%) pode ser explicado pelo fato do papel moeda ser composto por pigmentos, resinas e metais que o configuram como um papel especial e, com isso, o seu teor de matéria inorgânica é maior.

Com o objetivo de se verificar a continuidade da matéria inorgânica presente nas polpas após os tratamentos, adotou-se o tratamento com dispersante para se comparar com o resultado do teor de cinzas da matéria-prima. A diminuição dos teores de cinzas de 5,55% da matéria-prima para 3,45; 2,88; 2,85 e 2,76% dos tratamentos (Tabela 7) podem ser explicados pelo destintamento parcial promovido pelo processo termomecânico. A matéria-prima quando submetida aos tratamentos, lixivia parte de seus pigmentos e da resina, diminuindo o teor de matéria inorgânica presente na polpa final. Entretanto, o teor de cinzas não constitui uma limitação para a reciclagem do papel moeda, já que a qualidade das suas fibras destinada à produção de papel não é afetada por esse parâmetro.

6.3. POLPAÇÃO

6.3.1. Rendimentos e Viscosidade

A Tabela 8 mostra os valores de rendimentos e da viscosidade das polpas obtidas pelo processo termomecânico de reciclagem do papel moeda. As Tabelas 13, 14, 15, 16, 17 e 18 (Anexo A) mostram detalhadamente as

análises descritivas e de variância realizados para estes parâmetros de caracterização da polpa.

TABELA 8. Valores de rendimentos e da viscosidade da polpa estudada, por tratamento.

Disp, %	Tempo, horas	RB, %	PARÂMETRO				Visc, cm ³ .g ⁻¹
			TR, %		RD, %		
			<i>sem refino</i>	<i>com refino</i>	<i>sem refino</i>	<i>com refino</i>	
0	4	89,84 n.s	73,43 a	40,06 a	16,41 c	49,78 c	786 n.s
	8	89,51 n.s	65,67 b	36,33ab	23,84 c	53,18bc	715 n.s
	16	90,21 n.s	43,95 c	27,10 b	46,26 b	63,11 b	708 n.s
	32	89,94 n.s	25,26 d	17,60 c	64,68 a	72,34 a	703 n.s
1	4	90,16 n.s	67,60 a	33,84 a	22,56 c	56,32 c	**
	8	88,86 n.s	62,71 b	34,32ab	26,15 c	54,54bc	**
	16	89,30 n.s	46,76 c	30,70 b	42,54 b	58,60 b	**
	32	89,93 n.s	24,41 d	12,48 c	65,52 a	77,45 a	**
2	4	90,28 n.s	72,49 a	38,33 a	17,79 c	51,95 c	554 n.s
	8	90,56 n.s	63,99 b	34,34ab	26,57 c	56,22bc	684 n.s
	16	89,50 n.s	49,79 c	33,81 b	39,71 b	55,69 b	512 n.s
	32	89,15 n.s	23,42 d	12,13 c	65,73 a	77,02 a	658 n.s
4	4	91,26 n.s	74,65 a	50,53 a	16,61 c	40,73 c	**
	8	88,80 n.s	75,43 b	34,73ab	13,37 c	54,07bc	**
	16	91,35 n.s	48,53 c	34,51 b	42,82 b	56,84 b	**
	32	89,47 n.s	26,38 d	17,12 c	63,09 a	72,35 a	**
8	4	90,63 n.s	75,68 a	42,62 a	14,95 c	48,01 c	**
	8	90,38 n.s	65,23 b	29,75ab	25,15 c	60,63bc	**
	16	90,73 n.s	50,62 c	32,11 b	40,11 b	58,62 b	**
	32	90,12 n.s	26,72 d	15,05 c	63,40 a	75,07 a	**

*Disp= Dispersante, RB= Rendimento bruto médio, TR= Teor de rejeitos médio, RD= Rendimento depurado médio, Visc= Viscosidade.

**Viscosidade não realizada no tratamento.

***Valores assinalados com letras diferentes, dentro da mesma coluna, diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

****Registra-se que valores assinalados com letras são significativos apenas em comparação com o fator tempo. Com relação à concentração do dispersante os parâmetros foram não significativos.

Observando-se a Tabela 8, verifica-se que não houve diferenças significativas para o rendimento bruto com relação às concentrações do

dispersante químico e os tempos dos tratamentos. Tanto o coeficiente de variação como o desvio padrão para este parâmetro (Tabela 13 – Anexo A) são considerados baixos, mostrando que o experimento foi bem conduzido e os valores obtidos estão próximos. Observa-se ainda que o rendimento bruto médio manteve-se acima de 88% em todos os tratamentos (Figura 6), demonstrando que a dispersão a quente à 80°C sob agitação, mesmo sem a presença do dispersante químico, foi eficaz para a primeira etapa do processo de individualização das fibras. Altos rendimentos em processos de polpação termomecânicos também são citados por West (1928), IPT (1988a), Fengel & Wegner (1989), Nazhad (1994), Hubbe et al. (2007).

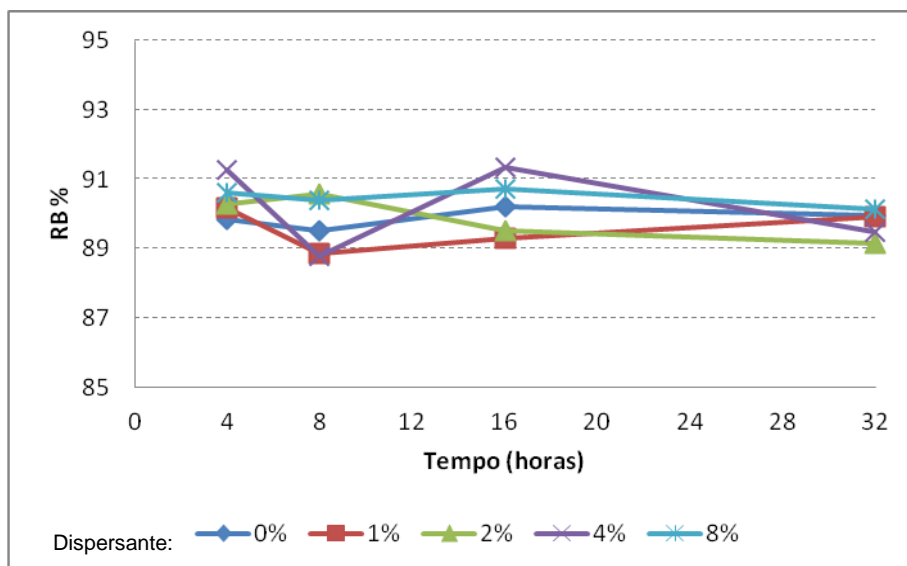


FIGURA 6. Rendimento bruto médio (RB) das polpas por tratamento.

O teor de rejeitos foi analisado considerando os tratamentos estudados (tempo e dispersante) antes e depois do refino. As Tabelas 14 e 15 do Anexo A mostram que não houve diferença significativa com relação às concentrações do dispersante químico. No entanto, para os tempos, a análise de variância foi significativa. Neste caso, aplicou-se o teste de média Tukey a 5% de significância (Tabela 9). Registra-se, mais uma vez que os valores para este parâmetro, encontrados na Tabela 8, refere-se a comparações com o fator tempo.

TABELA 9. Valores médios do teor de rejeitos em relação ao tempo de cada tratamento.

Tempo (horas)	Teor de Rejeitos (%)	
	sem refino	com refino
4	72,77a	41,08a
8	66,60b	33,90ab
16	47,93c	31,49b
32	25,24d	14,88c

*Os valores médios do teor de rejeitos de cada tempo (horas), assinalados com letras diferentes, na mesma coluna, diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Analisando a Tabela 9, observa-se que à medida que o tempo aumentou no dispersante, independente da concentração deste, houve um aumento significativo no teor de rejeitos, tanto para polpa não refinada como para a refinada. O tempo de refino contribuiu para a diminuição do teor de rejeito. Quanto maior este tempo menor o teor de rejeitos. Isto refletiu no rendimento da polpa depurada, aumentando o seu rendimento com a diminuição do teor de rejeitos.

As Figuras 7 e 8 mostram claramente a influência do refino no teor de rejeitos. Polpas refinadas apresentam menores teores de rejeitos, que segundo OJALA (1980) irá também melhorar a resistência e a qualidade desta polpa.

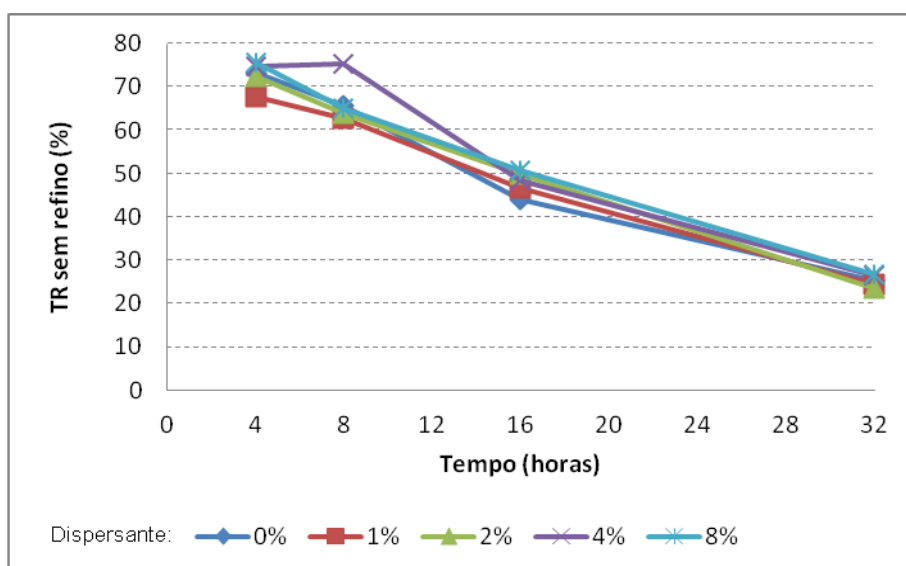


FIGURA 7. Teor de rejeitos (TR) médio sem refino dos tratamentos.

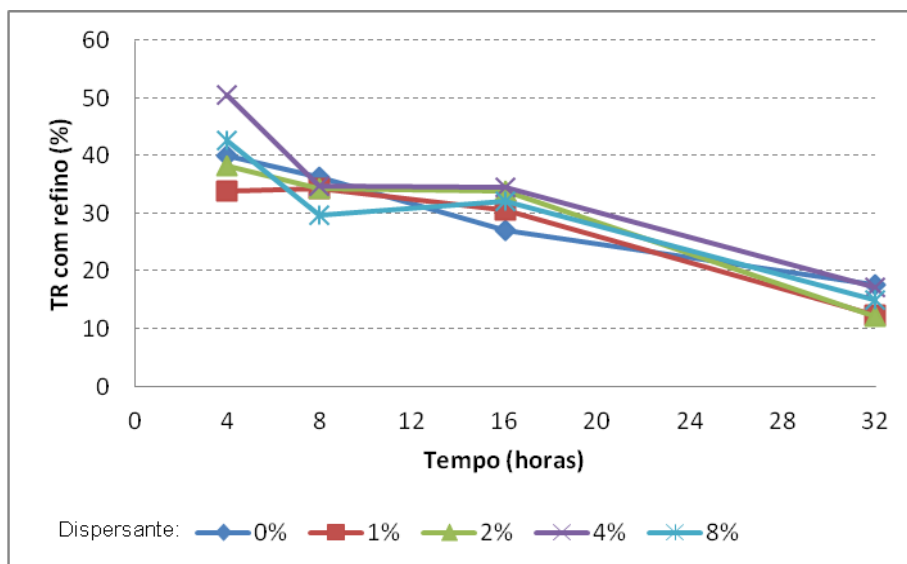


FIGURA 8. Teor de rejeitos (TR) médio com refino dos tratamentos.

Ainda considerando as Figuras 7 e 8, independente da carga do dispersante químico, a variação exponencial do tempo influenciou no teor de rejeitos final das polpas, onde, quanto maior o tempo, menor o teor de rejeitos e maior a fadiga mecânica exercida sobre as fibras; o que pode representar uma perda do potencial de ligação das fibras recicladas nos tratamentos de maior tempo.

As Tabelas 16 e 17 (Anexo A) mostram que os valores dos rendimentos depurados não apresentaram diferenças significativas em relação as concentrações do dispersante químico. No entanto, para os tempos utilizados em cada tratamento, a análise de variância foi significativa. Assim, aplicou-se o teste de média Tukey a 5% de significância (Tabela 10) para análises dos rendimentos depurados em relação aos tempos nos tratamentos. Registra-se, mais uma vez que os valores para este parâmetro, encontrados na Tabela 8, refere-se a comparações com o fator tempo.

TABELA 10. Valores médios do rendimento depurado em relação ao tempo de cada tratamento.

Tempo (horas)	Rendimento Depurado (%)	
	sem refino	com refino
32	66,10a	74,78a
16	41,61b	60,15b
8	23,10c	55,81c

* os valores médios dos rendimentos depurados, sem e com refino, de cada tempo (horas), assinalados com letras diferentes, na mesma coluna, diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Como previsto, o rendimento depurado, sem e com refino, teve comportamento inverso ao teor de rejeito. Isto é, quanto maior o teor de rejeito, menor o rendimento depurado. Polpas com tempo menores na presença do dispersante, independente da sua concentração, mostrou tendência de menor rendimento depurado, pois o teor de rejeito foi mais elevado. As polpas refinadas seguem a mesma tendência. Na comparação entre os rendimentos depurados sem e com refino, verifica-se que o refino contribui para o aumento do rendimento depurado. Também há uma tendência do tempo de refino ser positivo para o aumento do rendimento depurado. Segundo o IPT (1988b), deve-se tomar cuidado com o aumento de tempo de refino prolongados, pois o refino contribui para seccionar as fibras, havendo diminuição da resistência da polpa, principalmente para a propriedade de resistência ao rasgo.

As Tabelas 8 e a 18 do Anexo A, juntamente com a Figura 9, mostram o comportamento da viscosidade das polpas em relação a dois tratamentos estudados. Por limitação de quantidade de material, esta propriedade não foi realizada nos demais tratamentos.

A viscosidade reflete o grau de despolimerização ou degradação sofrido durante o processo de polpação. Isto é, a viscosidade mede o comprimento da cadeia de celulose (GP - grau de polimerização). Segundo Carneiro et al. (1995), a viscosidade é uma das propriedades mais discutidas como referência da qualidade de polpas. Os métodos de determinação da viscosidade são tradicionalmente adotados como referência para o grau de degradação química da celulose causada pelos processos de cozimento e de branqueamento. Entretanto existe muita controvérsia quanto a validade deste parâmetro como um indicador das propriedades físico mecânicas das polpas.

Observa-se que não houve diferenças significativas para a viscosidade com relação as concentrações do dispersante químico e aos tempos dos tratamentos (Tabela 8). Os valores da viscosidade das polpas estão em um intervalo de 512 a 786cm³ g⁻¹.

As viscosidades das polpas considerando o fator tempo se encontram em níveis próximos (Figura 9). Apesar dos valores não apresentarem diferenças estatísticas, verifica-se tendência das polpas sem a adição de dispersante químico mostrar viscosidade superior, indicando uma menor perda da resistência intrínseca das fibras.

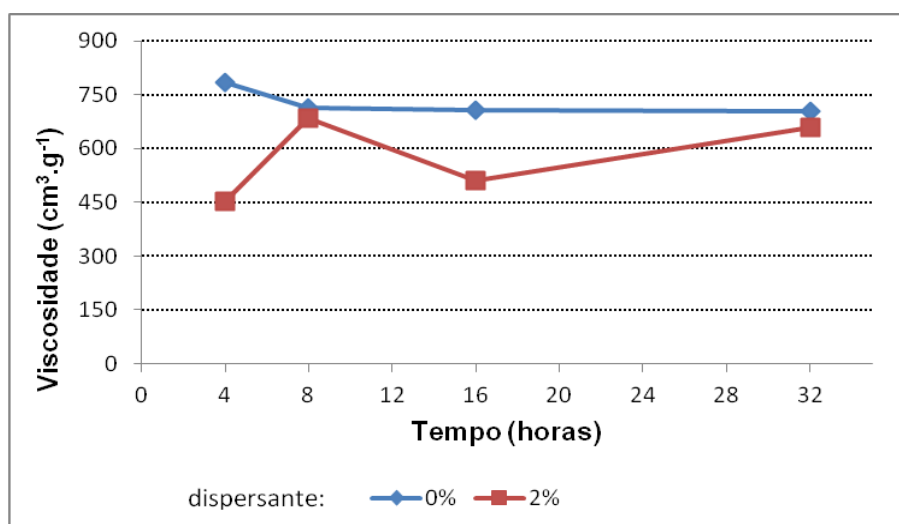


FIGURA 9. Viscosidade dos tratamentos à 0% e à 2% de dispersante químico.

Com os resultados mostrados até o momento, é possível afirmar que o processo termomecânico apresentou melhores condições nas polpas com refino, com um teor de rejeitos abaixo de 18% nos tratamentos de 32 horas e entre 27,10% e 50,53% para os tratamentos de 4, 8 e 16 horas, não havendo relação com as cargas de dispersante. O teste de Tukey a 5% de significância indicou semelhança entre os tratamentos com refino no tempo de 8 e 16 horas. Para o grau de viscosidade da polpa, a presença do dispersante parece não influenciar, não trazendo ganhos para esta propriedade.

6.3.2 Análise do licor

A análise do licor ao longo do cozimento é uma importante ferramenta no acompanhamento de processos de polpação, fornecendo informações precisas sobre o processo (SEGURA, 2012). Em processos termomecânicos é necessário que se garanta a distribuição uniforme da temperatura e do vapor no processo de individualização das fibras (TYRVÄINEN, 1995).

O pH influencia diretamente nas ligações entre as fibras, em função da deposição ou não da lignina presentes no licor sobre as fibras. Assim, o pH alcalino, por exemplo, é indicado quando se quer favorecer o processo de intumescimento da fibra.

Neste estudo, foi estipulado um pH entre 7,0 e 8,0. Esta faixa de pH, para este tipo de matéria prima (papel moeda) e para o processo empregado, melhora as condições de individualização das fibras durante o processo. Para correção do pH, quando necessário foi adotado o CaO (óxido de cálcio) em todos os tratamentos. De acordo com a Figura 10, o pH se manteve acima de 7,2 não indicando a necessidade de novas correções do pH ao longo do processo de polpação.

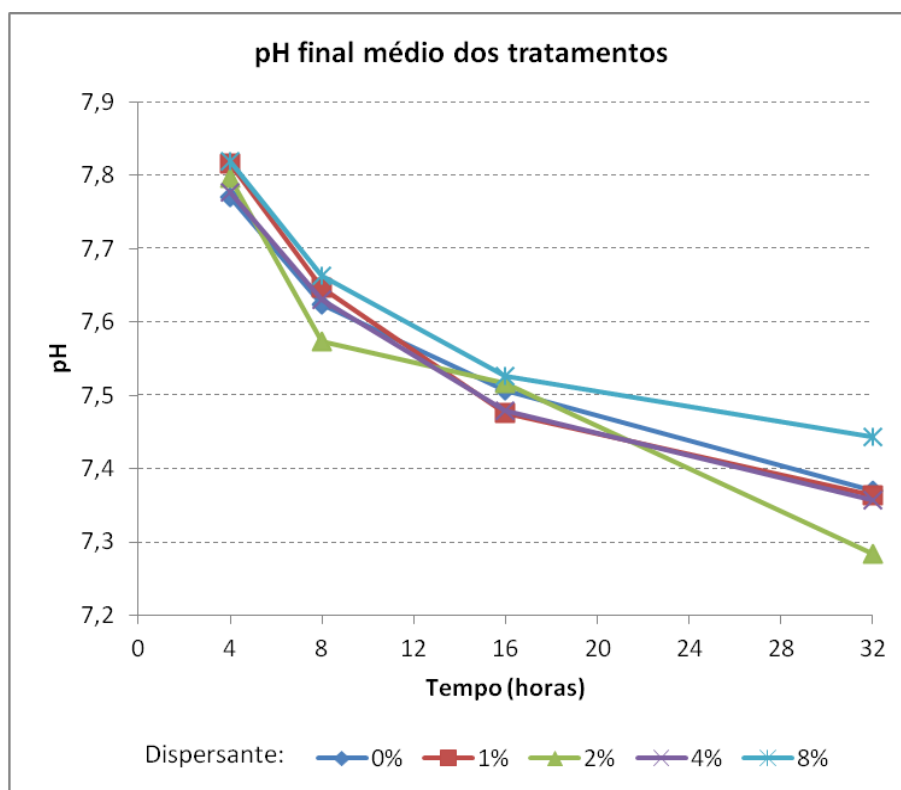


FIGURA 10. pH final médio dos tratamentos.

Além de influenciar na molhabilidade das fibras para sua individualização, o pH é um importante parâmetro adotado na Resolução nº430, de 13 de maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) que dispõe sobre as condições, parâmetros, padrões e diretrizes

para gestão do lançamento de efluentes em corpos de água receptores. Dentre outras condições e padrões previstos nesta resolução, o pH para lançamento de efluentes deve estar entre 5 e 9; o que condiz com os valores encontrados ao final de cada tratamento do presente estudo.

As atividades com potencial de geração de resíduos perigosos devem gerenciar e classificar seus efluentes, atentando-se aos parâmetros dispostos na legislação ambiental aplicável em cada seguimento da atividade industrial. Dentre os contaminantes químicos presentes nesses resíduos os metais pesados destacam-se por seu potencial poluidor e persistente, englobando um grupo muito heterogêneo de metais, semi-metais e mesmo não metais como o selênio (ALLOWAY, 1995).

Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução CONAMA e em outras normas aplicáveis. Os níveis de contaminantes orgânicos e inorgânicos, por exemplo, ajudam a caracterizar o potencial poluidor desses efluentes.

A Tabela 11 mostra os valores máximos permitidos para os parâmetros inorgânicos dispostos nesta resolução, em comparação com os valores encontrados neste estudo.

TABELA 11. Limites de lançamentos de efluentes da Resolução CONAMA nº430/2011 em comparação com os resultados dos parâmetros inorgânicos do licor gerado pelos tratamentos.

Parâmetros Inorgânicos	Conama	Licor			
	nº430/2011, mg L ⁻¹	Mínimo, mg L ⁻¹	Máximo, mg L ⁻¹	Média, mg L ⁻¹	Desvio Padrão
Alumínio, Al*	-	-0,25	3,37	1,15	0,87
Boro, B	5,00	-13,42	-11,35	-12,75	0,47
Bário, Ba	5,00	-0,07	3,98	0,49	0,81
Berílio, Be*	-	-0,35	-0,25	-0,29	0,02
Cálcio, Ca*	-	44,47	83,52	61,16	8,85
Cádmio, Cd	0,20	-0,19	-0,18	-0,19	0,00
Cobalto, Co*	-	0,23	0,76	0,50	0,11
Cromo, Cr	0,10	-0,32	-0,26	-0,29	0,01
Cobre, Cu	1,00	1,36	3,19	2,23	0,40

Ferro, Fe	15,00	-0,12	1,29	0,17	0,26
Potássio, K*	-	6,02	52,04	33,61	8,64
Magnésio, Mg*	-	13,89	29,01	19,72	3,14
Manganês, Mn	1,00	-0,13	0,08	-0,06	0,04
Sódio, Na*	-	108,72	284,60	170,17	33,54
Níquel, Ni	2,00	-0,03	0,10	0,04	0,03
Fósforo, P*	-	0,18	1,08	0,59	0,17
Chumbo, Pb	0,50	-0,26	-0,17	-0,23	0,02
Enxofre, S*	-	15,73	48,30	26,27	7,45
Silício, Si*	-	-5,80	0,92	-3,20	1,65
Estanho, Sn	4,00	-1,95	-0,08	-0,15	0,26
Tálio, Ti*	-	-0,11	31,82	3,57	6,01
Zinco, Zn	5,00	0,50	1,10	0,85	0,16
Zircônio, Zr*	-	-0,19	0,01	-0,12	0,05

*A Resolução CONAMA nº430/2011 não se aplica a esses parâmetros.

A análise dos parâmetros inorgânicos é uma importante ferramenta de classificação dos efluentes do processo de polpação. Os resultados da análise dos metais pesados residuais pelo método ICP-OES (Tabela 11) em comparação com a Resolução CONAMA considera que os elementos boro, bário, cádmio, cromo, ferro, manganês, níquel, chumbo, estanho e zinco não apresentam um fator de contaminação para o licor gerado nos tratamentos deste estudo.

Os valores encontrados para o cobre variaram entre 1,36 e 3,19 mg L⁻¹ (média de 2,23) estando acima do valor de 1,0 mg L⁻¹ estabelecido na Resolução, indicando que o cobre representa um fator de contaminação para o licor gerado pelos tratamentos deste estudo. Além de um possível fator de risco de contaminação de corpos receptores, e por isso não recomendável o seu lançamento em sistema público de tratamento de esgoto, devendo ser buscado, portanto, um método de tratamento.

O monitoramento dos metais pesados presentes nos efluentes é importante para se controlar os resíduos perigosos descartados que são contaminantes bioacumulativos e tóxicos ao meio ambiente.

6.5. TESTES FÍSICO-MECÂNICOS DAS POLPAS

Levando-se em consideração que o dispersante químico não apresentou significância estatística nos parâmetros analisados na polpa, os tratamentos à 0% de dispersante em todos os tempo (4, 8, 16 e 32 horas) foram submetidos ao processo de refino em refinador PFI e tiveram suas propriedades físico-mecânicas avaliadas, após a formação de folhas (Tabela 12).

TABELA 12. Valores médios dos ensaios físico-mecânicos, das folhas formadas em laboratório, do tratamento sem dispersante.

Parâmetro	Medida	Tempo (hora)									
		4		8	16			32			
		0	2000	0	0	500	1000	0	100	250	1000
Revoluções		16,50	47,25	24,00	21,50	33,75	42,25	34,75	39,50	47,25	64,00
Grau Schopper (°SR)		63,52	63,69	61,68	63,19	63,44	63,08	62,64	64,26	62,53	62,90
Gramatura, g m ⁻²	média	0,16	0,13	0,16	0,16	0,15	0,14	0,15	0,15	0,14	0,12
Espessura, mm	D.P.	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	média	2,57	1,98	2,51	2,48	2,33	2,22	2,44	2,29	2,22	1,89
Volume específico, cm ³ g ⁻¹	D.P.	0,07	0,08	0,08	0,16	0,11	0,10	0,13	0,12	0,19	0,11
	média	0,39	0,51	0,40	0,40	0,43	0,45	0,41	0,44	0,45	0,53
Densidade aparente, g ⁻¹ cm ³	D.P.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,03
	média	8,83	22,86	12,17	11,28	16,65	21,59	14,34	17,03	21,24	24,28
Índice de tração, Nm g ⁻¹	D.P.	0,95	3,57	1,53	1,42	2,37	1,82	2,72	1,15	2,10	2,22
	média	3,46	5,17	4,58	4,12	4,65	5,07	4,86	4,74	5,12	4,69
Índice de rasgo, mN m ² g ⁻¹	D.P.	0,18	0,18	0,26	0,33	0,44	0,14	0,55	0,41	0,22	0,21
	média	0,45	1,29	0,66	0,63	0,95	1,08	0,88	0,96	1,10	1,33
Índice de arrebentamento, kPa m ² g ⁻¹	D.P.	0,02	0,08	0,04	0,07	0,07	0,07	0,08	0,05	0,08	0,09
	Média	-	11,80	85,40	96,40	29,50	19,30	31,60	22,10	15,10	4,80
Permeância ao ar (Gurley), mm Pa s ⁻¹	D.P.	-	1,20	8,80	9,70	1,70	1,20	1,80	2,40	0,50	0,70

*Os valores apresentados referem-se à média e ao desvio padrão (D.P.) de dez determinações para os ensaios de espessura e de cinco determinações para os ensaios de resistência à tração, resistência ao arrebentamento, resistência ao rasgo e permeância ao ar, Gurley.

** Em alguns casos não foi possível determinar a resistência ao ar - Gurley, devido à alta velocidade de descida do êmbolo.

O fato do número de revoluções ter atingido níveis distintos para cada amostra, corrobora para indicar diferentes observações quanto as propriedades do papel, já que o grau de refino das polpas influencia diretamente nos resultados dos testes físico-mecânicos das folhas formadas. Nesse contexto, considerou-se o número de revoluções como um indicador, e não um ponderador, para a análise destas propriedades.

A resistência à drenagem das polpas foi determinado pelo grau Schopper-Riegler ($^{\circ}\text{SR}$) que é um importante parâmetro indicativo do grau de entrelaçamento das fibras da polpa. Os resultados indicam que a drenabilidade aumenta com o aumento da intensidade do refino, traduzida pelo número de revoluções. A variação de 16,50 a 64,00 $^{\circ}\text{SR}$, está de acordo com Segura (2012), que encontrou para as polpas das madeiras de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Acacia mearnsii* utilizadas para a produção de celulose kraft pelos processos convencional e Lo-solids®, valores de $^{\circ}\text{SR}$ entre 20,00 e 60,00.

As propriedades físicas são importantes, pois afetam a maioria das propriedades, principalmente as mecânicas e as ópticas. A gramatura, por exemplo, é uma das propriedades físicas que influencia diretamente o índice de tração, que é o quociente entre a resistência à tração e a gramatura (IPT, 1988b). Neste estudo, a gramatura manteve-se na faixa de 61,68 - 64,26g m⁻² e teve um comportamento linear com o aumento das revoluções, próximo ao intervalo de 67 - 69g m⁻² encontrado por Cit (2007).

A gramatura juntamente com a espessura, que é a distância perpendicular entre as duas superfícies principais do papel, influenciam diretamente o volume específico da folha. Este é definido como o volume em centímetros cúbicos de um grama de papel e pode ser afetado por muitos fatores, tais como o grau de ligação das fibras, presença de materiais não-fibrosos que preenchem os espaços vazios, e a calandragem (IPT, 1988b). Os valores de espessura de folha entre 0,12 - 0,16mm e volume específico entre 1,89 - 2,57cm³ g⁻¹ diminuem enquanto aumenta o grau de refino das polpas. Assim como encontrado por Cit (2007), com espessuras de folha de 0,11 a 0,12mm e volume específico de 1,66 a 1,80cm³ g⁻¹ para a polpa kraft em diferentes proporções de *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunni*.

Na mesma direção das outras propriedades físicas do papel, a densidade aparente é afetada pela composição fibrosa e pelo grau de refino (IPT, 1988b). A grande amplitude da densidade aparente do papel moeda ($0,39 - 0,53 \text{g}^{-1} \text{cm}^3$) pode ser explicada por ser um material composto tanto de fibras curtas como longas, como visto na caracterização morfológica deste trabalho. Observa-se também um aumento da densidade aparente com o aumento do refino, que está próximo à variação encontrada por Cit (2007) de $0,55 - 0,60 \text{g}^{-1} \text{cm}^3$ para a polpa kraft produzida da mistura de *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunnii*.

A permeância ao ar é uma propriedade estrutural do papel que depende do número, tamanho, formato e distribuição dos poros no papel. Observa-se que índice de permeância ao ar encontrado para o papel moeda está entre $4,80 - 96,40 \text{mm Pa s}^{-1}$, tendendo a diminuir com o aumento do refino, demonstrando grande influência do colapso das fibras no resultado do ensaio e mostrando, em parte, coerência com o estudo de Bastianello et al. (2009).

Além de influenciar na propriedades físicas, o refino influencia diretamente nas propriedades mecânicas das polpas, melhorando também a qualidade e a resistência das fibras (CASEY, 1961).

A maneira do papel resistir à ação de forças externas, da umidade e do calor, depende da sua composição fibrosa e de sua formação. A resistência do papel é muito importante nos casos onde este deve resistir a um esforço aplicado. Esta resistência, sendo um termo vago, precisa ser identificada quanto à sua natureza, como, por exemplo, a resistência à tração e ao rasgo (IPT, 1988b).

A resistência à tração é relacionada com a durabilidade e utilidade de um papel e é afetada pela resistência individual das fibras, comprimento médio das fibras e formação e estrutura da folha (IPT, 1988b). O índice de tração do papel moeda deste estudo está no intervalo entre $8,83$ a $24,28 \text{Nm g}^{-1}$ e está de acordo com o observado por Zanuncio et al. (2011) para a polpa de eucalipto.

O índice de rasgo também é afetado pelo comprimento das fibras e a ligação entre elas. Neste estudo, o índice de rasgo está na faixa entre $3,46 - 5,17 \text{mN m}^2 \text{g}^{-1}$, que também está de acordo com o observado por Zanuncio et al. (2011).

A resistência ao arrebentamento é controlada por diversos fatores, como as variações na gramatura e na espessura do papel. A crescente refinação e a baixa ao arrebentamento pode ser atribuída, em parte, ao corte das fibras, dado pelo excesso de refinação (IPT,1988b). O índice ao arrebentamento encontrados neste trabalho está no intervalo entre 0,45 - 1,33kPa m² g⁻¹. Este resultado está de acordo com encontrado por Bastianello et al. (2009) para a mistura de papéis reciclados artesanais com resíduos de bananeira ou palha de arroz, que encontrou valores entre 0,46 a 1,55kPa m² g⁻¹.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

- O rendimento bruto médio manteve-se acima de 88%, demonstrando que a dispersão a quente, mesmo sem a presença do dispersante químico, foi eficaz para a primeira etapa do processo de individualização das fibras.
- A variação exponencial do tempo influenciou no teor de rejeitos final das polpas, assim como nos resultados da refinação, indicando que quanto mais refinada a polpa, maior o seu rendimento depurado.
- As polpas sem a adição de dispersante químico são as que mostraram tendências de viscosidade final superior, indicando uma menor perda da resistência intrínseca das fibras.
- O pH se manteve acima de 7,3 indicando ser eficiente no processo de individualização de fibras.
- O licor gerado nos tratamentos de obtenção da polpa não apresenta um fator de contaminação para o boro, bário, cádmio, cromo, ferro, manganês, níquel, chumbo, estanho e zinco. Já o cobre representa um possível fator de risco de contaminação de corpos receptores, sendo recomendável um método de tratamento antes de ser lançado no sistema público de tratamento de esgoto. Ademais, recomenda-se uma análise orgânica do efluente gerado pelo tratamento de reciclagem do papel moeda.
- A polpa produzida mostrou ter propriedades físico-mecânicas semelhantes a outras polpas de mercado.
- Os testes físico-mecânicos das polpas do papel moeda servem de indicativo para os fatores que influenciam nas propriedades do papel, como a refinação e a morfologia das fibras. Entretanto, recomenda-se uma maior amostragem do número de revoluções para se assegurar a conformidade dos índices com a qualidade do papel produzido.
- A polpação termomecânica foi eficaz para o processo de individualização das fibras do papel moeda e apresentou melhores resultados nas polpas com refino e sem dispersante,

disponibilizando, assim, um material alternativo para a produção de papel no âmbito da reciclagem.

- Os resultados do processo termomecânico adotado neste estudo apresentaram rendimentos e qualidades tecnológicas apropriadas para a produção de polpa reciclada a partir do papel moeda.
- O desenvolvimento de técnicas mais apropriadas que visem o aproveitamento desta fibra, desde sua retirada de circulação até a confecção de novo produto (papel) é importante para que haja uma otimização do processo, contribuindo para uma diminuição do descarte inadequado do papel moeda retirado de circulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLOWAY, B. J. **Heavy metals in soils**. Blackie Academic & Professional, 2. Ed. 1995.
- ANDRADE, A.S. de. Qualidade da madeira, celulose e papel em *Pinus taeda* L.: Influência da idade e classe de produtividade. **Dissertação** (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. 94p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. Normas de ensaio. São Paulo: ABTCP, s.d., n.p.
- AZZINI, A.; CIARAMELLO, D.; SALGADO, A.L.B.; TOMAZELLO FILHO, M. Densidade básica do colmo e fibras celulósicas em progênies de *Bambusa tuldoidea* Munro. **Bragantia**, Campinas, v. 47, n. 2, p.239-246, 1984.
- BACEN. **Organização / Institucional**. Disponível em: < <http://www.bcb.gov.br/?mecirinst> >. Acesso em: 09 fev. 2013.
- BARRICHELO, L. E. G & FOELKEL, C. E. B. Estudos para produção de celulose sulfato de seis espécies de eucalipto. **IPEF**, n.12, p.77-95, 1976.
- BASSOI, L.J.; NIETO, R.; TREMAROLI, D. Implementação de Testes de Toxicidade no Controle de Efluentes Líquidos. **CETESB/PROCOP**, São Paulo, 1990.
- BASTIANELLO, S.F.; TESTA, R.C.; PEZZIN, A.P.T.; SILVA, D.A.K. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de papéis reciclados artesanais com resíduos de bananeira ou palha de arroz. **Matéria**, vol.14, no.4. Rio de Janeiro, 2009.
- BECKER, C. Falta de dinheiro para lavar. **Revista Piauí**, Ed. 72, set. 2012.
- BIERMANN, C.J. **Handbook of pulping and papermaking**. Academic Press. 2 ed. San Diego, 1996. 754p
- BLANCO ROJAS, M.L. Beneficiamento e polpação da ráquis da bananeira “nanicão” (*Musa grupo AAA, “Giant cavendishi”*). Piracicaba, 1996. 150 p. **Dissertação** – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- BRACELPA. **Dados do setor**. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/booklet.pdf>>. Acesso em: 06 abr. 2013.
- BRASIL. **Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. 2010.
- BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. Interscience Publishers: New York, 1963. 689p

BUGAJER, J. KUAN, G. S. S. Comportamento das misturas de pastas celulósicas de eucalipto e pinho na fabricação de papel. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 1980, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1980. p. 53-65.

BUSNARDO, C. A. Refinação de polpa de eucalipto e suas aplicações em diferentes tipos de papéis. **Relatório Técnico**, 368. Guaíba: Riocell, 1990. 25 p.

CARNEIRO, E.S.; WEHR, C.J.G.; MANFREDI, T.R. Efeito da viscosidade nas propriedades físico-mecânicas de polpas branqueadas. In: II Congresso Anual de Celulose e Papel, **ABTCP**, n.28, São Paulo, 1995. p 227-234

CARVALHO, R. M. M. A.; SOARES, T. S.; VALVERDE, S. R. Caracterização do setor florestal: uma abordagem comparativa com outros setores da economia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 1, p. 105-118, 2005. ISSN 0103-9954

CASEY, J. P. **Pulp and paper chemistry and chemical technology**. Interscience Publishers, Inc., 2ª ed. New York, 1961. V.3

CIT, E.J. Qualidades das folhas de polpa kraft em diferentes proporções de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* M. **Dissertação** (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007. 67p

CONAMA. **Resolução n. 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n. 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. 2011.

COSTA, J. A. Qualidade da madeira de *Eucalyptus urograndis*, plantado no Distrito Federal, para produção de celulose kraft. **Dissertação de Mestrado** em Ciências Florestais. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2011. 86p.

ESCANDOLHERO, J. M.; SOUZA, A. M. de; HESS, S. C. Reciclagem de papel em Campo Grande – MS e outros locais. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre. **Anais...** ABES, Ref. III-065. 2000.

FENGEL, D & WEGNER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. New York: Walter de Gruyter, 1989.

FENGEL, D. & GROSSER, D. Holz, Morphologie and Eigenschaften. In: **Ullmanns Encyklopaedie der technischen Chemie**. 4th Ed. Vol. 12. Verlag Chemie. Weinheim, 1976. p. 669–679

FIALHO, M. L. "O Papel Reciclado" Uma análise de aspectos sociais e ambientais. **Dissertação** (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1996.

FOELKEL, C. E. B. & BARRICHELO, L. E. G. **Tecnologia de celulose e papel**. Piracicaba: ESALQ, 1975. 207p

FOELKEL, C. Madeira do eucalipto: da floresta ao digestor. In: Congresso sobre a qualidade da madeira. **B.inf.**, Piracicaba, v.6, nº20. São Paulo, 1978.

FONSECA, R.G. da. Hidrofilidade em fibras de algodão branco e naturalmente colorido. V Congresso Brasileiro de Algodão. **Anais...** Bahia, 2005.

FONTES, A. A., SILVA, M. D., Valverde, S. R., & SOUZA, A. D. Análise da atividade florestal no Município de Viçosa, MG. **Revista Árvore**, v. 27, n. 4, 2003.

GARCEZ, L.R.O. Reaproveitamento celulósico do papel moeda retirado de circulação. **Monografia**. Faculdade de Tecnologia – Universidade de Brasília. Brasília, 2010.

GARG, M. & SINGH, S. P. Reasons of strength loss in recycled pulp. **Appita J.** n. 59, v.4, p. 274-279, 2006.

GARLIP, R. Eficiência, gestão, contratos e sustentabilidade na indústria baseada em florestas plantadas. In: **Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural**. Brasília: SOBER, 2005. p. 1-20.

GORING, D. A. I. Thermal softening of lignin, hemicelluloses and cellulose. **Pulp and Paper Magazine** of Canada 64: 89-118. 1963.

HOFMANN-GATTI, T. **História do papel artesanal no Brasil**. 1ª Edição, Ed. ABTCP, São Paulo. 2007. 300p ISBN 13: 9780005356159

HOFMANN-GATTI, T.; ANDREOLLI, J.C.; DERZE, T.N.; FREITAS, S.R. da C.; ANDRADE, S. R. de. Reciclagem de papel moeda com utilização de atirresistência a úmido. 29º Congresso Anual de Celulose e Papel da ABTCP, **Anais...** São Paulo, 1996.

HUBBE, M. A.; VENDITTI, R. A.; ROJAS, O. J. How fibers change in use, recycling. **BioResources** 2(4), 739-788, 2007.

IPT INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2 ed. São Paulo: IPT/SENAI, v.1. 560 p., 1988a.

IPT INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2 ed. São Paulo: IPT, v. 2, 1998b.

KLOCK, H., MUNIZ, G.I.B de; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. de. **Química da Madeira**. Série Didática da FUPEF/PR, 3ª. Edição. Curitiba- PR, 2005.

LAYRARGUES, P. P. O cinismo da reciclagem: o significado ideológico da reciclagem da lata de alumínio e suas implicações para a educação ambiental. **In: Educação ambiental: repensando o espaço da cidadania.** p.179-219. São Paulo: Cortez, 2002.

LIBBY, C. E. **Pulp and paper science and technology: paper.** McGraw-Hill, New York, 1962. V. 2

LINS, C; OUCHI, H. C.; SUSTENTÁVEL–FBDS, D. Sustentabilidade Corporativa – Papel e Celulose. **FBDS**, Rio de Janeiro, 2006.

LUNDBERG, R. & de RUVO, A. The influence of drying condition on the recovery of swelling and strength of recycled fibers. **Svensk Papperstidn**, n.11, p. 355-357, 1978.

MACEDO, A. R. P.; VALENÇA, A. C. V. Reciclagem de papel. **BNDES Setorial**, n. 2, p.5 – 22, Dez. 1995.

MARTON, R.; BROWN, A.; GRANZOW, S.; KEOPPICUS, R.; TOMLINSON, S. **Recycling and fiber structure.** Progress in Paper Recycling, 2:58-70, 1993.

McDONOUGH, T.J. Kraft pulp yield basics. In: Breaking the pulp yield barrier symposium. Atlanta: **TAPPI**, p 1-19, 1998.

MILANEZ, A. F.; BARTH, P.P.O.; PINHO, N.C. Influência das hemiceluloses nas propriedades óticas e físico-mecânicas da polpa. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 15, 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Celulose e Papel, 1982. p. 155-170.

MIRANDA, C.R.; BARRICHELO, L.E.G. Celulose de madeira de *Eucalyptus citriodora*: influência do tamanho dos cavacos. In: Congresso Anual de Celulose e Papel, São Paulo: **ABTCP**, p 1-34, 1991.

MUNIZ, R. Representantes do Banco Central do Brasil acompanham projeto de reutilização de cédulas velhas de real. Assessoria de Comunicação, Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, set. 2011. Disponível em: <http://www.portal.ufra.edu.br/attachments/1819_banco%20central.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2013.

NASCIMENTO, A.C.; MOREIRA, J.V.; SANTOS, R.A. dos; MARQUES, R.G.; IAROSZ, K.C. Influência de fibras recicladas na propriedades físico-mecânicas do papel. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, V.1, nº 1, dezembro, 2009. ISSN 2176-7270

NAZHAD, M. M. Fundamentals of strength loss in recycled paper. **PhD thesis of Philosophy** - Department of Forestry, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1994. 171p

NIETO, R. **I-067-Characterização ecotoxicológica de efluentes líquidos industriais** - ferramenta para ações de controle da poluição das águas. In:

XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), Rio Grande do Sul, 2000.

OJALA, P. Recovery of thermal energy from a thermomechanical pulp plant. **US Patent** 4,231,842, 1980.

OLIVEIRA, M. H. Principais matérias-primas utilizadas na indústria têxtil. **BNDES Setorial**, 1997.

PAULA, J. E. Caracterização anatômica de madeiras nativas do cerrado com vistas à produção de madeira. **Revista Cerne**, Lavras, v.5, n.2, p.26-40, 1999.

PAULONIS, M. A. Adaptive inferential kraft batch digesters control based on cooking liquor analysis. Thesis (Doctor of Philosophy) – Department of Chemical Engineering. Auburn University, **Auburn**, 1990. 288p

POGGIANI, F.; STAPE, J. L.; GONÇALVES, J. L. M. Indicadores de sustentabilidade das plantações florestais. **Série Técnica IPEF**. v. 12, n. 31, p. 33-44, abril, 1998.

QUEIROZ, S.C.S.; GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa Kraft de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. **Revista Árvore**, v.28, n.6, p. 901-909, 2004.

REZENDE, M. A.; ESCOBEDO, J.F.; FERRAZ E.S.B. Retratibilidade volumétrica e densidade aparente da madeira em função da umidade. **IPEF**, n.39, p.33-40, ago.1988

RODRIGUEZ, L. C. E. Monitoramento de florestas plantadas no Brasil: indicadores sociais e econômicos. **Série Técnica**, IPEF v. 12 n. 31, p. 23-32, abril, 1998.

ROWELL, R. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composite**. CRC Press: New York, 2005. 481p

SANTOS, C.R. Métodos não-convencionais para determinação de celulose como parâmetro de seleção de árvores matrizes visando a produção de polpa kraft-AQ. **Dissertação** (Mestrado em Ciência da Tecnologia de Madeira) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000. 117p

SCOTT, W. E.; ABBOTT, J. C.; TROSSET, S. **Properties of paper: an introduction**. 2 ed TAPPI PRESS. Atlanta, 1995. 191p.

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

SILVA, R.P. & OLIVEIRA, R.C. de. Efeitos da ação do refino e da reciclagem nas propriedades de papéis de pinus e Eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa – MG, v.24, n.3, p.-349-360, 2000.

SIMS, C. In Recycling of Greenbacks, New Meaning for Old Money. **The New York Times**, 22 may 1994.

SMOOK, G. A. **Handbook for pulp & paper technologists**. 2nd. Angus Wilde Publications Inc. Vancouver, 1992. 419p.

SOARES, N. S.; OLIVEIRA, R. J. D.; CARVALHO, K. H. A. D.; SILVA, M. L. D.; JACOVINE, L. A. G., VALVERDE, S. R.. A cadeia produtiva da celulose e do papel no brasil. **Floresta**, v. 40, n. 1, 2010.

TAVARES, R. L. M & COSTA, C. A. C. Influência de cédulas de real decompostas na dinâmica de solos de várzea. Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA - Belém/PA. **Anais...** VIII Congresso de Ecologia do Brasil, Caxambu – MG, 2007. Disponível em: <<http://sebecologia.org.br/viiiiceb/pdf/137.pdf>> Acesso em: 10 fev. 2013.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus gummifera*, *E. microcorys* e *E. pilularis*. **IPEF**, n.30, p.45-54, ago.1985.

TONON, B. E. A construção da cultura através do papel artesanal. **Dissertação** de Pós-Graduação. Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, Ensino da Arte, Criciúma, 2006.

TYRVÄINEN, J. Wood and fiber properties of Norway spruce and its suitability for thermomechanical pulping. **Acta Forestalia Fennica**. 249. 155p. 1995.

VALVERDE, S. R.; SOARES, N. S.; SILVA, M. L. da; JACOVINE, L. A. G.; NEIVA, S. de A. O comportamento do mercado da madeira de eucalipto no brasil. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 4, p. 393-403, 2004.

VEAL, M. A. & JACKSON, M. A review of methods for characterization of mechanical pulp for papermaking. **TAPPI** Pulping Conference, 1985. P 367-369.

WEST, C. J.; WEBER, W. B.; WEINER, J. **Pulp and paper manufacture: Bibliography**. New York: Sebes, 1928.

WILHELM, M.; ZHAO, C. L.; WANG, Y.; XU, R.; WINNIK, M.A.; MURA, J. L.; RIESS, G.; CROUCHER, M.D. Poly(styrene-ethylene oxide) block copolymer micelle formation in water: a fluorescence probe study. **Macromolecules**, 24 (5), p 1033-1040, 1991.

ZANUNCIO, A.J.V.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C. de; Características químicas da polpa celulósica de eucalipto e as propriedades ópticas e físico-

mecânicas do papel. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v.02, n.02, p. 75-85, nov. 2011. INSS 2177-6830

ZOBEL B. J. & VAN BUIJTENEN J. P. **Wood variation**. Its causes and control. Springer, séries in Wood science, 1989. 363p

ANEXOS

Anexo A: Análise estatística descritiva e a ANOVA para os principais parâmetros da polpa.

TABELA 13. ANOVA e análise descritiva do rendimento bruto dos tratamentos.

Fator	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Sig (p)
Dispersante	Entre grupos	7,04	4	1,76	0,91	0,46
	Dentro dos grupos	106,28	55	1,93		n.s
	Total	246,43	59			
Tempo	Entre grupos	2,46	3	0,82	0,41	0,74
	Dentro dos grupos	10,86	56	1,98		n.s
	Total	113,32	59			
Análise descritiva	Média	89,74				
	D.P.	1,38				
	C.V.	0,17				

*D.P.= Desvio Padrão, C.V.= Coeficiente de Variação, SQ= Soma dos Quadrados, gl= Graus de liberdade, MQ= Média dos Quadrados, Sig(p)= valor de significância.

TABELA 14. ANOVA e análise descritiva do teor de rejeitos sem refino dos tratamentos.

Fator	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Sig (p)
Dispersante	Entre grupos	246,43	4	61,61	0,15	0,96
	Dentro dos grupos	21673,16	54	401,35		n.s
	Total	21919,59	58			
Tempo	Entre grupos	19793,09	3	6597,70	170,64	0,00*
	Dentro dos grupos	2126,49	55	38,66		
	Total	21919,59	58			
Análise descritiva	Média	53,61				
	D.P.	19,44				
	C.V.	2,53				

*D.P.= Desvio Padrão, C.V.= Coeficiente de Variação, SQ= Soma dos Quadrados, gl= Graus de liberdade, MQ= Média dos Quadrados, Sig(p)= valor de significância.

TABELA 15. ANOVA e análise descritiva do teor de rejeitos com refino dos tratamentos.

Fator	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Sig (p)
Dispersante	Entre grupos	270,92	4	67,73	0,42	0,79
	Dentro dos grupos	8718,83	54	161,46		n.s
	Total	8989,75	58			
Tempo	Entre grupos	5525,51	3	1841,84	29,24	0,00*
	Dentro dos grupos	3464,24	55	62,99		
	Total	8989,75	58			
Análise descritiva	Média	30,31				
	D.P.	12,45				
	C.V.	1,62				

*D.P.= Desvio Padrão, C.V.= Coeficiente de Variação, SQ= Soma dos Quadrados, gl= Graus de liberdade, MQ= Média dos Quadrados, Sig(p)= valor de significância.

TABELA 16. ANOVA e análise descritiva do rendimento depurado sem refino dos tratamentos.

Fator	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Sig (p)
Dispersante	Entre grupos	330,51	4	82,63	0,19	0,94
	Dentro dos grupos	24213,75	55	440,25		n.s
	Total	24544,27	59			
Tempo	Entre grupos	21734,46	3	7244,82	144,39	0,00*
	Dentro dos grupos	2809,81	56	50,17		
	Total	24544,27	59			
Análise descritiva	Média	37,03				
	D.P.	20,40				
	C.V.	2,63				

*D.P.= Desvio Padrão, C.V.= Coeficiente de Variação, SQ= Soma dos Quadrados, gl= Graus de liberdade, MQ= Média dos Quadrados, Sig(p)= valor de significância.

TABELA 17. ANOVA e análise descritiva do rendimento depurado com refino dos tratamentos.

Fator	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Sig (p)
Dispersante	Entre grupos	412,02	4	103,00	0,60	0,66
	Dentro dos grupos	9417,48	55	171,23		n.s
	Total	9829,50	59			
Tempo	Entre grupos	5354,64	3	1784,88	22,34	0,00*
	Dentro dos grupos	4474,86	56	7,91		
	Total	9829,50	59			
Análise descritiva	Média	59,93				
	D.P.	12,91				
	C.V.	1,66				

*D.P.= Desvio Padrão, C.V.= Coeficiente de Variação, SQ= Soma dos Quadrados, gl= Graus de liberdade, MQ= Média dos Quadrados, Sig(p)= valor de significância.

TABELA 18. ANOVA e análise descritiva da viscosidade dos tratamentos.

Fator	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Sig (p)
Dispersante	Entre grupos	45602,00	1	45602,00	6,527	0,04
	Dentro dos grupos	41922,00	6	6987,00		n.s
	Total	87524,00	7			
Tempo	Entre grupos	11711,00	3	3903,66	0,21	0,89
	Dentro dos grupos	75813,00	4	18953,25		n.s
	Total	87524,00	7			
Análise descritiva	Média	652,50				
	D.P.	111,82				
	C.V.	39,53				

*D.P.= Desvio Padrão, C.V.= Coeficiente de Variação, SQ= Soma dos Quadrados, gl= Graus de liberdade, MQ= Média dos Quadrados, Sig(p)= valor de significância.