

# O Efeito da Refinação na Recuperação das Propriedades Físico-Mecânicas de Papéis Reciclados de *Pinus*

*Effects of refining on recovery of physical-mechanical properties of recycled pinus fibers papers*

*Efecto de la refinación en la recuperación de las propiedades físico-mecánicas de papeles reciclados de pinus*

**Autores:** Rogério Peixoto Silva<sup>1</sup>; Rubens Chaves de Oliveira<sup>2</sup>

**Palavras-chave:** Reciclagem, refino, propriedades físico-mecânicas, celulose, eucalipto, *pinus*.

## RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da reciclagem em papéis de fibras longas (*Pinus*) considerando sua suscetibilidade ao processo, além de envolver os efeitos do refino como artifício de recuperação de perdas de propriedades em cada ciclo de reciclagem. No intuito de se comparar a suscetibilidade de reciclagem com papéis de fibra curta, efetuamos um paralelo com os mesmos parâmetros. As informações obtidas contribuem para o desenvolvimento de técnicas mais adequadas para a atividade de reciclagem. Os resultados mostram a eficiência da técnica de refino para recuperação da maioria das propriedades do papel degradadas pelo processo de reciclagem. A correta aplicação da intensidade do refino é essencial para evitar que as fibras não sejam prejudicadas pelo seu excesso, o que pode acarretar em perdas significativas na qualidade final do produto. Quedas significativas ocorrem no teor de hemicelulose da polpa com o aumento do número de ciclos da reciclagem, o que provavelmente contribui para a perda do potencial papeleiro das fibras secundárias. De um modo geral, a polpa de eucalipto estudada demonstra ser mais adequada à reciclagem que a polpa de *pinus* por nós utilizada, uma vez que foi menos prejudicada pelo pro-

**ABSTRACT**

*In this study it was evaluated the effect of refining and recycling procedures on technological characteristics of bleached eucalyptus pulp fibers and unbleached pinus pulp fibers. The results showed the development of a more appropriate technique for recycling activity. The refining procedure is a very efficient technique to recover properties of recycled paper. It is however necessary to apply it correctly in order not to cause fiber damage. Substantial loss on hemicellulose content of the pulp was intensified with recycling activity. It is probably the most responsible for the quality loss of the papermaking properties of the secondary fibers. In general, the eucalyptus pulp fibers showed to be stronger than pinus pulp fibers for recycling process. Besides, it reacts better the refining procedure for recovering its technological properties.*

**Keywords:** Recycling, refining, properties of recycled paper, pulp, eucalyptus, pinus.

cesso e responde melhor ao refino para recuperação de suas potencialidades.

## 1. INTRODUÇÃO

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, têm gerado oportunidades à intensificação do uso de materiais recicláveis.

O Brasil é um país que recicla papel há algum tempo e já atinge um

grande desenvolvimento no setor, tendo em vista as oportunidades do mercado interno e as possibilidades cada vez maiores de expandir seus negócios em nível internacional.

O aumento da utilização de fibras recicladas para uma demanda cada vez maior de papel tem estimulado o desenvolvimento de processos para melhoria da qualidade de fibras secundárias.

Apesar da reciclagem ser uma atividade promissora, existem problemas de ordem técnica e tecnológica com o produto ao final do processo,

## Referências

<sup>1</sup>Chefe Produção Celulose Irani

<sup>2</sup>Professor Titular do Dep. Engenharia Florestal UFV



que exigem intensivos estudos para desenvolvimento de soluções viáveis a estes fatos. Estes fatos estão relacionados às perdas de qualidade e propriedades finais do papel reciclado em relação ao produto original. Em decorrência destas perdas, geram-se limitações de qualidade das fibras celulósicas nos processos sucessivos de reciclagem.

Para contornar esses problemas a indústria papelreira dispõe de vários artifícios técnicos como: o refino, a adição de fibras virgens e a aplicação de aditivos. Todos estes contribuem para complementar a demanda do potencial de ligações inter-fibrilares perdidas com o processo de reciclagem.

A capacidade de ligação entre fibras secundárias é inferior, e normalmente é compensada com o uso de aditivos químicos. No entanto, o efeito prejudicial da reciclagem pode ser superado pelo efeito do refino, até certo ponto, além do qual a ação do refino pode também passar a ter um efeito prejudicial (Mc. Comb e Williams, 1981; Oliveira e Sabioni, 1998). Desta forma reconhece-se a necessidade de estudar o efeito do refino no processo de reciclagem, de forma a contribuir para o desenvolvimento da qualidade desses produtos e obter subsídios para um melhor controle desta técnica.

## 2. EFEITOS DA RECICLAGEM

As características iniciais das fibras exercem importantes funções na resistência do papel. No entanto, durante o processo de fabricação do papel, inúmeras mudanças ocorrem até se obter o produto acabado. Uma inter-relação entre as características físicas e químicas das fibras gera informações a respeito de várias mudanças que acontecem no processo de reciclagem. As mudanças nas características das fibras tendem a ser irreversíveis e reduzem o potencial papelero das fibras secundárias, a menos que se utilizem artifícios para que a formação do papel melhor se restabeleça.

Os efeitos da reciclagem em papéis têm sido alvo de várias pesquisas. Ellis e Sedlachek (1994), relatam

que as fibras quando retornam ao processo de fabricação do papel, ou seja, são recicladas, estão sujeitas a várias operações unitárias que modificam suas propriedades, diminuindo a qualidade do produto final. Observa-se que as operações de polpação, branqueamento, destintamento, drenagem e secagem, que impactam as propriedades das fibras, causam mudanças nas dimensões, na morfologia e na distribuição das fibras durante a formação do papel.

Das etapas de todo o processo, especialmente a secagem contribui com grande parte destas modificações. É consenso que o efeito da secagem age na perda da capacidade de inchamento das fibras, na flexibilidade e plasticidade, tornando-se irreversível de acordo com a drasticidade e intensidade desta etapa do processo.

A secagem influencia profundamente na morfologia das fibras, devido ao colapso irreversível que conduz a defeitos na sua estrutura, gerando potenciais porções cristalinas ao longo do polímero de celulose. Clark, citado por Mousa e Paszner (1994), em uma revisão de literatura acerca dos motivos da perda da força de ligações das fibras secundárias, relata que, no processo de secagem, superfícies de celulose e hemicelulose antes separadas, ou até mesmo suavemente ligadas, podem se ligar irreversivelmente através de fortes ligações de hidrogênio. Estas porções então se orientam de tal maneira que formam regiões cristalinas, reduzindo a capacidade de intumescência da fibra. Isto causa reduções de ligações entre elas, o que normalmente torna o papel reciclado menos resistente.

Uma maior parte cristalina restringe a flexibilidade, e quanto maior a superfície de enrijecimento menor será a superfície capaz de entrelaçamento entre as fibras. Sabe-se que um bom entrelaçamento é fundamental para uma boa estruturação do papel. Esse enrijecimento irreversível, chamado de *hornificação*, é o responsável pelo maior problema na reciclagem de papéis.

Embora ocorram desestruturações na fibra com o processo de reciclagem,

é possível contornar o problema usando a técnica de refino. O refino ocasiona a quebra de ligações internas, fibrilação e delaminações, modificando a superfície e tornando-a mais flexível sobrepondo o efeito da cristalinidade. Em função deste artifício é que se procura verificar, neste estudo, o efeito do refino nos vários ciclos de reciclagem para a recuperação das potencialidades das fibras.

## 3. MATERIAIS E METODOLOGIA APLICADA

Os materiais utilizados neste estudo constituem-se de uma polpa industrial de Eucalipto *Uro-Grandis* branqueada por seqüência ECF e de uma polpa industrial de *Pinus (Spruce)*, porém, não branqueada, de número *kappa* 25.

### 3.1 Preparação da polpa

As polpas industriais, caracterizadas por folhas comerciais de celulose, foram primeiramente hidratadas por cerca de quatro horas em quantidade suficiente para todos os tratamentos determinados. Depois de hidratadas foram desaguadas, armazenadas em sacos plásticos e acondicionadas em refrigeradores. As polpas, em quantidades suficientes para a realização da pesquisa, foram refinadas inicialmente a um grau de refino de 40 °SR, em moinho do tipo PFI, em nível de consistência de 10%, com o objetivo de obter os papéis a serem reciclados.

### 3.2 Formação de folhas para os testes físico-mecânicos.

As folhas foram obtidas em formador laboratorial tipo Tappi, com 60 g/m<sup>2</sup> ± 2, de acordo com a norma TAPPI 205 om-81. Foram acondicionadas em ambiente climatizado com temperatura de 23 ± 1°C e umidade relativa do ar de 50 ± 2% para realização dos testes físico-mecânicos e ópticos. Uma quantidade suficiente de papel, tanto de *pinus* quanto de eucalipto, foi produzida, de tal forma que uma parte deste papel foi utilizada para a realização dos testes físico-mecânicos, teores de  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  celulosos e viscosidade; e a outra parte reidrata-





da, desagregada em Polpador laboratorial e utilizada novamente para formação de novas folhas de papel, completando o primeiro ciclo de reciclagem. O mesmo procedimento foi feito para a complementação dos ciclos subsequentes. Foi realizado um total de quatro ciclos, completando o procedimento de reciclagem. O número de quatro ciclos foi escolhido devido ao fato que as maiores perdas de propriedades ocorrem dentro dos primeiros ciclos, com tendência à estabilização após o quarto ciclo. Após a realização de cada ciclo, a polpa foi submetida a três níveis de refino pré-determinados com o objetivo de recuperar as perdas de propriedades.

### 3.3 Refino

Anteriormente ao refino, os papéis foram desagregados por 4.000 rotações em desagregador laboratorial tipo Regmed. Posteriormente, a polpa obtida foi refinada em moinho laboratorial do tipo PFI onde a intensidade de refino aplicado foi avaliada em graus Schopper-Riegler (°SR), de acordo com a norma TAPPI T 248 cm-85.

Os níveis de refino aplicados foram previamente estudados e suficientemente distribuídos para recuperar as perdas de propriedades dos papéis aos níveis iniciais.

### 3.4 Testes físico-mecânicos das polpas

Os testes e análises aplicados a cada tratamento e suas respectivas normas são apresentados no Quadro 1.

A polpa de *Pinus* não foi submetida ao teste de viscosidade uma vez que os resultados obtidos com o papel de eucalipto não apresentaram diferença significativa durante o processo experimental. Pelo fato desta propriedade apresentar variáveis semelhantes à polpa de eucalipto entende-se que não seria necessário realizá-lo.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados de comportamento das polpas de *pinus* e de eucalipto por nós utilizadas, referentes ao impacto da reciclagem, mostram perdas nas propriedades dos papéis reciclados em relação ao papel original. As maiores perdas acontecem logo no primeiro e segundo ciclos, sendo o primeiro ciclo mais drástico. Esse efeito mais intenso no primeiro ciclo também foi observado por Bugajer (1976) e Chaves e Sabioni (1998), que atribuem uma maior transformação nas estruturas da fibra nesta fase, sendo que a partir daí a irreversibilidade estrutural, decorrente principalmente do processo de secagem, torna as demais transformações menos intensas.

O tratamento de refino necessário para recuperação das propriedades ao nível inicial foi aplicado em intensi-

dades distintas para os papéis de cada espécie. A polpa de *pinus* necessitou de 7.000 revoluções (89 Wh de energia específica). Já para a de eucalipto o consumo foi menor, 38 Wh, correspondentes a 3.000 revoluções no PFI.

Os graus de refinamentos obtidos são mostrados em seguida (Quadros 2 e 3) apenas como referência e para efeito de comparação entre as necessidades de cada polpa, uma vez que o objetivo principal foi o de obter um nível de refinação que nos permitisse uma recuperação das potencialidades papelarias perdidas com a reciclagem.

A tendência dos resultados indica que as perdas nas propriedades dos papéis são menos intensas a cada ciclo consecutivo de reciclagem, ao contrário do efeito do refino, que se destaca com mais intensidade na recuperação das potencialidades perdidas ao 3º e 4º ciclos.

Os resultados obtidos são apresentados, para melhor visualização, em forma de gráficos, o que permite a observação das tendências de cada uma das propriedades analisadas. Algumas das propriedades, de ocorrência mais usual para a indústria papelaria, são discutidas, a seguir, conforme o modo em que foram avaliadas nos procedimentos de reciclagem e refino para sua recuperação.

### 4.1 Resistência à tração:

A resistência à tração, neste estudo, é expressa pelo índice de tração. As ligações interfibrilares ocorridas na formação do papel serão fundamentais para se discutir essa propriedade. Em geral houve uma queda significativa (de 43%) desta propriedade para os papéis reciclados de eucalipto, em relação ao produto inicial, reforçando a idéia de que a reciclagem diminui o potencial de ligação entre as fibras. Para os papéis de *pinus*, a redução foi de 54%, uma perda mais intensa que a dos papéis de eucalipto. (Figura 1).

A ação do refino recuperou as propriedades iniciais em níveis aceitáveis. Provavelmente as delaminações superficiais favoreceram o aparecimento de novas superfícies de conta-

Quadro 1: Normas seguidas para cada teste executado

TESTES	NORMAS
$\alpha$ , $\gamma$ celuloses	TAPPI T 203 om-93
Gramatura	TAPPI T 410 om-93
Espessura	TAPPI T 411 om-89
Índice de Rasgo	TAPPI T 414 om-88
Índice de Arrebatamento	TAPPI T 403 om-91
Índice de Tração*, Módulo de Elasticidade Específico, Alongamento e Energia de Deformação	TAPPI T 494 om-88
Alvura **	TAPPI T 452 om-92
Opacidade e Coeficiente de Dispersão de Luz **	TAPPI T 519 om-96
Resistência à Passagem de Ar	TAPPI T 536 om-96
Maciez Gurley	ABTCP p 35/94
Lisura Gurley	ABTCP p 35/94

\* Realizado no aparelho Instron modelo 4204, com sistema computadorizado de aquisição, análise e saída de dados, com distância entre garras de 100 mm, velocidade de teste de 25 mm/minuto e capacidade da célula de carga de 1000 N. Simultaneamente, este teste fornece as seguintes informações: força, tensão e deformação ao limite de proporcionalidade, energia de deformação (TEA), e módulo de elasticidade específico.

\*\* Testes realizados no aparelho Datacolor E2000.



**Quadro 2- °SR em função da refinação para polpa de Eucalipto**

° SR em cada ciclo de reciclagem				
Nº Revoluções no PFI	1º Ciclo de Reciclagem	2º Ciclo de Reciclagem	3º Ciclo de Reciclagem	4º Ciclo de Reciclagem
0	27.0	25.0	26.0	23.0
1000	43.0	32.0	29.0	27.0
2000	47.0	39.0	37.0	33.0
3000	54.0	46.0	43.5	42.0

**Quadro 3- °SR em função da refinação para polpa de Pinus**

° SR em cada ciclo de reciclagem				
Nº Revoluções no PFI	1º Ciclo de Reciclagem	2º Ciclo de Reciclagem	3º Ciclo de Reciclagem	4º Ciclo de Reciclagem
0	19.0	16.0	14.0	14.0
1400	32.0	24.0	19.0	18.0
4200	60.0	52.0	43.0	41.0
7000	74.0	74.0	68.0	69.0

to, além de restabelecer a capacidade de formar ligações de hidrogênio. De uma maneira geral, a melhor resposta ao refino foi no 4º ciclo. Isto indica que o enrijecimento progressivo das fibras causado pelas sucessivas secagens, provavelmente tornou-as mais frágeis e susceptíveis à ação das lâminas do refinador. As fibras de *pinus*, como na maioria dos testes, necessitaram de uma maior energia de refino para atingir os valores iniciais das fibras virgens.

#### 4.2 Resistência ao arrebentamento:

A resistência ao arrebentamento 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 962 mm<sup>2</sup>. Polpas com menores teores de finos e maior comprimento de fibras, em geral, geram papéis com maior resistência ao arrebentamento. Possivelmente, devido à presença de maior número de ligações do tipo β 1-4, que possuem maior energia de ligação que as ligações de hidrogênio. Estas últimas, abundantes em polpas com maior teor de finos e fibras de menor comprimento, são mais facilmente rompidas quando

lhes é aplicada uma força (Kwei, Jacques, Quan, 1996).

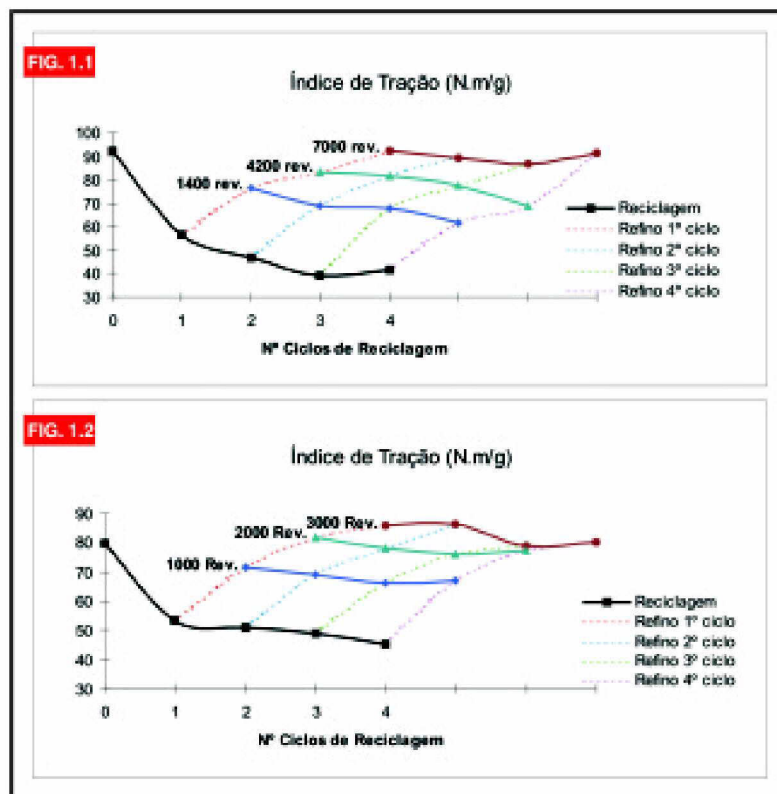
Devido à importância do comprimento da fibra na resistência ao arrebentamento, papéis formados com fibras longas, as quais em geral são

mais flexíveis, experimentam um maior impacto nesta propriedade quando sofrem algum tipo de modificação proveniente da reciclagem e do refino. De fato, é o observado neste estudo. Enquanto os papéis de *pinus* sofreram uma queda de 56%, os de eucalipto apresentaram uma menor perda, 43% (Figura 2).

#### 4.3 Módulo de elasticidade específico:

O módulo de elasticidade específico expressa a capacidade de um material resistir à deformação, quando submetido a um esforço, a cada variação crescente de carga aplicada por unidade de massa específica do material. É derivado da inclinação da seção linear elástica da curva de tensão versus deformação, que neste estudo foi obtido em regime de tração. Em outras palavras, maiores valores de módulo de elasticidade específico indicam a capacidade do material em absorver carga sem, contudo, sofrer deformações substanciais, o que expressa o seu potencial de rigidez.

Em 1979, Page *et al.*, descrevem que os principais fatores que influ-



**FIGURA 1: Índice de Tração em função dos ciclos de reciclagem com aplicação de refino em cada ciclo para recuperação da propriedade. (Fig. 1.1- Pinus ; Fig. 1.2- Eucalipto)**



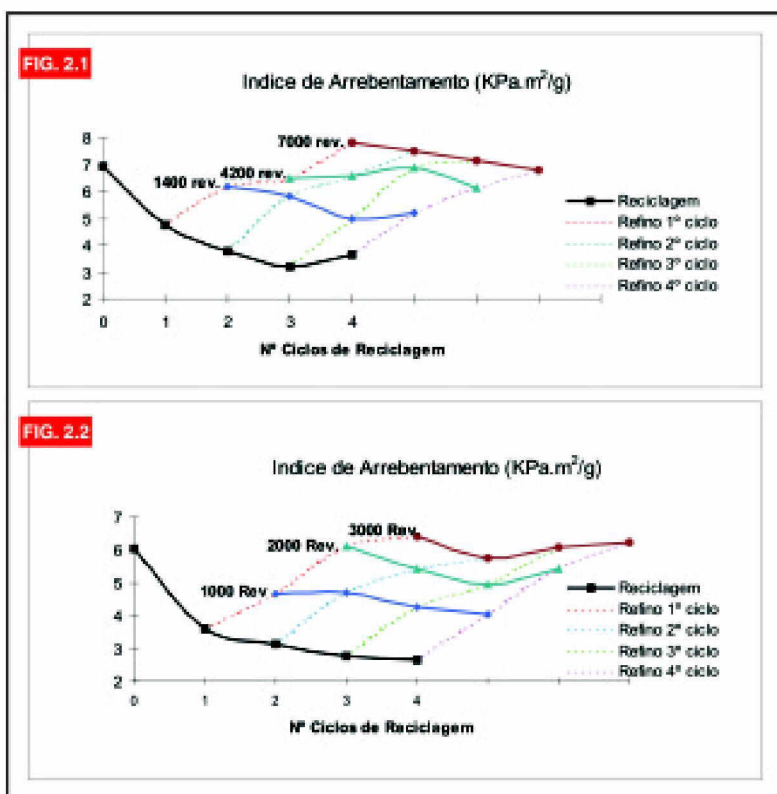


FIGURA 2: Índice de Arrebetamento em função dos ciclos de reciclagem com aplicação de refino em cada ciclo para recuperação da propriedade. (Fig. 2.1- *Pinus*; Fig. 2.2- *Eucalypto*)

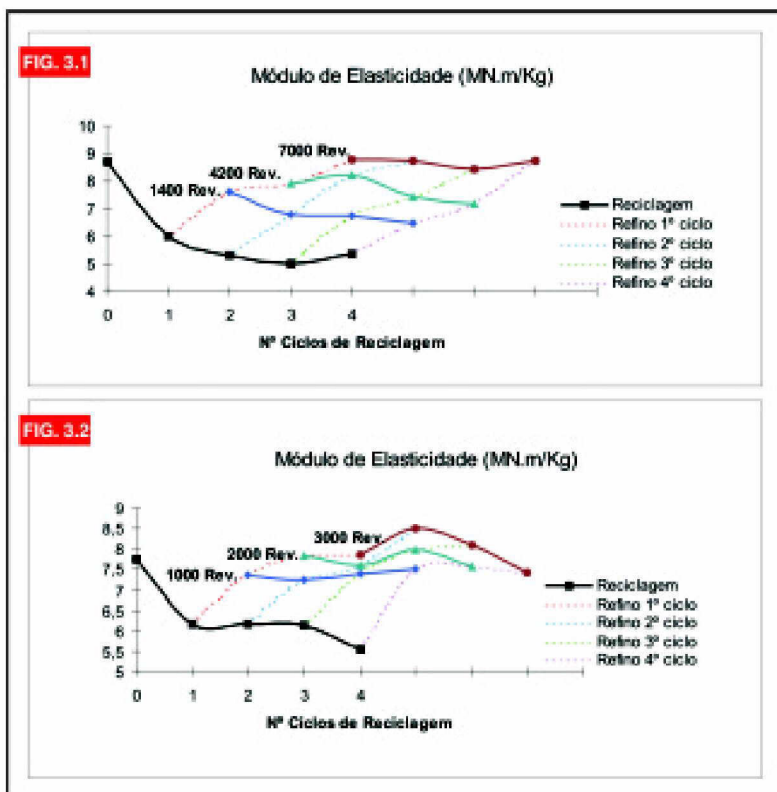


FIGURA 3: Módulo de Elasticidade Específico em função dos ciclos de reciclagem com aplicação de refino em cada ciclo para recuperação da propriedade. (Fig. 3.1- *Pinus*; Fig. 3.2- *Eucalypto*).

enciam o módulo de elasticidade do papel, além do número de ligações, é a rigidez das fibras que no papel formado elevam o módulo de elasticidade. Fibras mais rígidas alongam menos, portanto resistem mais às deformações quando sob a aplicação de uma força.

Os resultados obtidos apresentaram uma redução de 29% para os papéis de eucalypto, em comparação aos 38% encontrados nas folhas de *pinus* (Figura 3). Isto mostra que uma maior fração de parede das fibras de eucalypto, quando submetidas à secagem, tendem a um maior enrijecimento, resistindo mais à carga aplicada. Contudo, as fibras de *pinus*, por serem menos rígidas, são mais susceptíveis à perda de sua propriedade, já que se deformam mais. Isto vem a confirmar que a reciclagem tende a gerar um endurecimento nas fibras devido, principalmente, à operação de secagem.

#### 4.4 Resistência ao rasgo:

A resistência ao rasgo é, por definição, o trabalho executado por um *pendulum*, necessário para rasgar um conjunto de folhas, após um corte inicial previamente realizado nas amostras. A força necessária para rasgar a amostra sob condição de teste é obtida da divisão do valor do trabalho executado pela distância total de rasgo na qual a força é aplicada. Neste estudo, a resistência ao rasgo é expressa na forma de índice de rasgo, o qual é o resultado da divisão da força média necessária para rasgar uma folha pela gramatura da amostra.

Como já relatado por D'Almeida (1988), o comprimento da fibra é uma dimensão importante no desenvolvimento de resistência ao rasgo. É citado, também, que resistência intrínseca das fibras relacionada à espessura da parede celular se mostra influente no desenvolvimento da resistência ao rasgo, sendo esta característica mais significativa em fibras longas.

Na Figura 4.2, conforme esperado, com a reciclagem o índice de rasgo decresce. Isto se explica pelo fato de

as ligações entre as fibras, mais relevantes em papéis de fibras curtas, terem sido comprometidas pelo enrijecimento causado na secagem. Com o refino aplicado, a capacidade de ligação entre elas foi melhorada, elevando novamente o índice de rasgo.

Em fibras longas, o comportamento se mostra o inverso. Na Figura 4.1 observa-se que houve um ganho substancial na resistência ao rasgo até o segundo ciclo, tendendo a manter-se nos ciclos subsequentes. Este comportamento, também foi observado em fibras longas por Alfredo e Sayuri (1997), que consideraram o efeito bem mais marcante que em outras misturas de fibras usadas em seus ensaios.

Se as resistências individuais das fibras, suas ligações intrínsecas e seus comprimentos forem mais relevantes para fibras longas, o fenômeno de *hornificação* causado pela ação da reciclagem contribui para um ganho elevado no índice de rasgo. Porém, ao se refinar a fibra longa, verifica-se uma redução do índice de rasgo

mais intensa a cada ciclo sucessivo de reciclagem. Logo, se gradualmente a fibra se torna menos flexível e mais rígida com a reciclagem, ela poderá estar cada vez mais frágil à ação das lâminas do refinador e mais susceptível à redução de seu comprimento, ocasionando maior tendência de queda na resistência ao rasgo com a evolução da refinação.

#### 4.5 Energia de deformação (TEA):

A energia de deformação expressa o trabalho realizado por uma amostra de papel quando submetida a esforços de tração até a sua ruptura total. Indica a habilidade em absorver energia sob condições de aplicações crescentes de carga. Esta propriedade é muito dependente das características de formação e do potencial de conformabilidade das fibras na folha de papel. Isto indica que as características morfológicas das fibras são de grande importância para o desenvolvimento desta propriedade, principalmente comprimento da fibra, espessura da parede celular e diâmetro do lúmen.

Dentre as características morfológicas das fibras, o diâmetro do lúmen tem maior influência no potencial de conformabilidade e colapsabilidade das fibras durante a formação do papel. No entanto, fibras mais longas são em geral mais flexíveis, o que aumenta o potencial de colapsabilidade na formação do papel. Contudo, fibras com maior fração parede, com a ação do refino, podem sofrer maior efeito de desfibrilamento aumentando o potencial de ligações interfibras, o que pode favorecer a absorção de energia quando da aplicação de uma força de tração.

Tanto o *pinus* quanto o eucalipto sofreram uma variação de suas propriedades com a reciclagem, em torno de 67% do valor inicial. A Figura 5 mostra mais claramente que as duas espécies respondem de maneira relativamente similar ao reciclo e ao refino, provavelmente, devido ao fato de que a morfologia das fibras favorece as características eminentes em ambos os tipos de fibras para esta propriedade.

#### 4.6 Resistência à passagem de ar (RPA):

Representa a dificuldade que um determinado volume de ar encontra para passar através uma folha de papel e é dependente do número, tamanho, forma e distribuição dos poros no material.

Com a perda na habilidade de se ligar entre si, devido à reciclagem, as fibras não se distribuem de maneira uniforme e condensada na formação do papel, com isso são gerados espaços vazios reduzindo consideravelmente a resistência à passagem do ar.

Verificamos que apesar de quedas significativas com a reciclagem (Figura. 6), a ação do refino age de modo eficiente no desenvolvimento de ligações interfibrilares refletindo no incremento desta propriedade. É fácil observar, também, o potencial e sensibilidade à resposta das fibras secundárias ao refino. Porém, à medida que se tornam mais rígidas e quebradiças, as fibras, quando recebem um tratamento mecânico mais intenso tendem a ser mais danificadas, comprometendo a boa estruturação do papel.

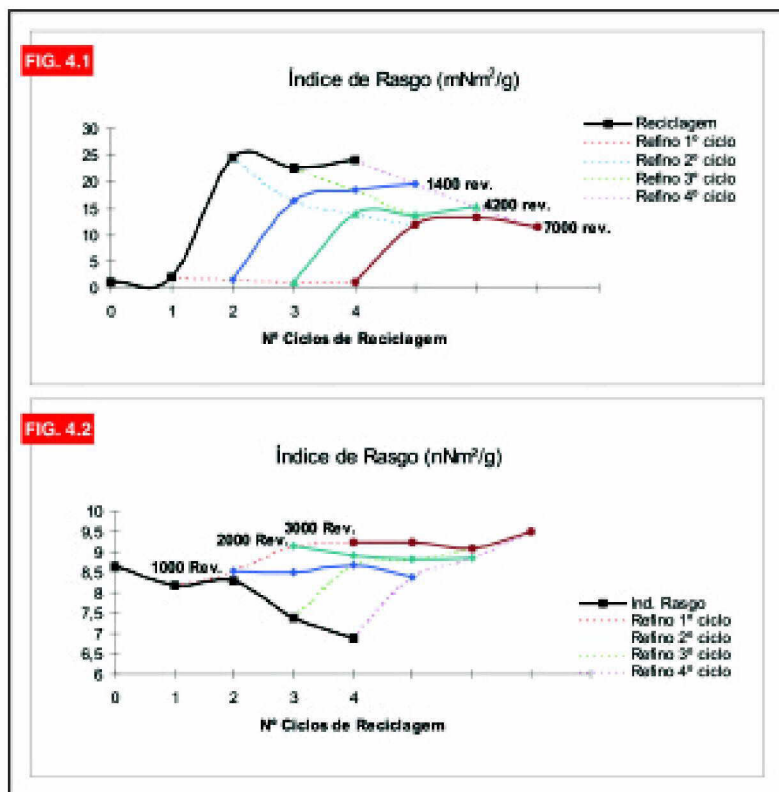


FIGURA 4: Índice de Rasgo em função dos ciclos de reciclagem com aplicação de refino em cada ciclo para recuperação da propriedade. (Fig. 4.1- *Pinus*; Fig. 4.2- *Eucalipto*)



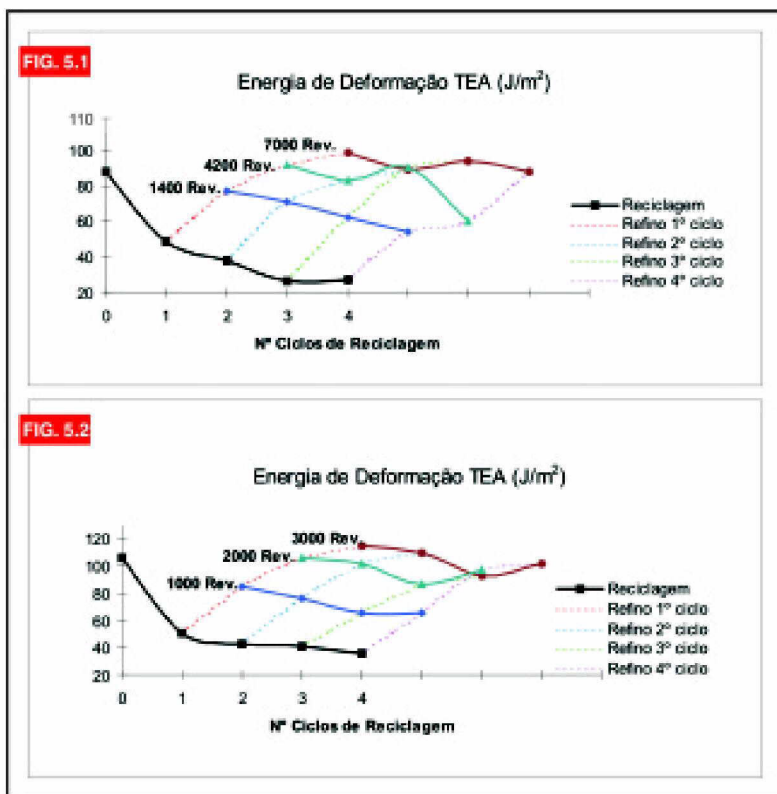


FIGURA 5: Energia de Deformação em função dos ciclos de reciclagem com aplicação de refino em cada ciclo para recuperação da propriedade. (Fig. 5.1- Pinus; Fig. 5.2- Eucalypto)

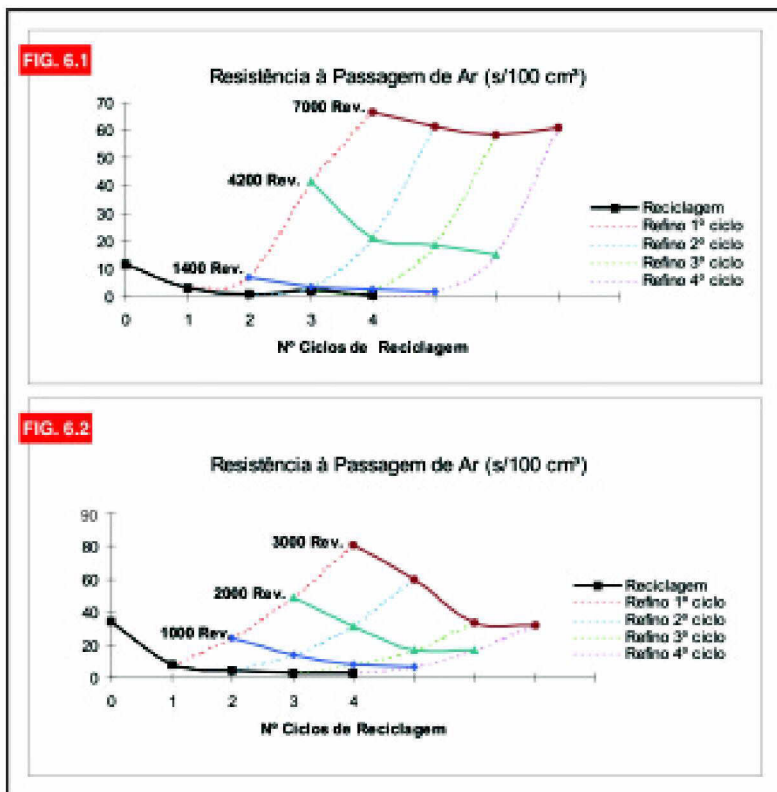


FIGURA 6: Resistência à Passagem do ar em função dos ciclos de reciclagem com aplicação de refino em cada ciclo para recuperação da propriedade. (Fig. 6.1- Pinus; Fig. 6.2- Eucalypto)

Pode-se verificar, também, que o desenvolvimento do refino foi favorecido para os papéis obtidos de eucalypto que necessitou de uma menor energia na refinação, refletindo na formação de estruturas menos porosas em folhas de papel.

#### 4.7 Opacidade e coeficiente de dispersão de luz:

Além de quedas nas propriedades físicas e mecânicas do papel, discutidas anteriormente, em decorrência da reciclagem, mudanças nas propriedades ópticas na folha também acontecem, e não são menos importantes. A estrutura do papel possui vários elementos que formam interfaces entre si e com o ar. Devido a esse fato, a luz incidente é refletida, espalhada e absorvida. Estes fenômenos de dispersão, absorção e espalhamento são responsáveis pelas características ópticas do papel. Propriedades que envolvem a dispersão de luz estão intimamente relacionadas e podem interagir, como é o caso da opacidade que é dependente, segundo a teoria de Kubelka e Munk, dos coeficientes de dispersão de luz e da absorção de luz.

Resumidamente, essas propriedades variam com o número de superfícies ópticas de refração e de espalhamento da luz. Quanto mais superfícies de refração existirem no papel, mais fácil será para a luz incidente ser refratada e menor será a quantidade de luz que irá alcançar o lado oposto.

Com maior número de fibras e partículas existentes na folha maior será a refração, pois a luz é obrigada a atravessar mais interfaces fibra-ar. Neste caso, quanto maior o número de fibras maior será a área superficial interna da estrutura das folhas, favorecendo a dispersão, que aumenta a opacidade e o coeficiente de dispersão de luz. Apesar do exposto, não é correto afirmar que o refino tem influência positiva na opacidade. Apesar de aumentar a área superficial em exposição, aumenta também a superfície de ligação en-

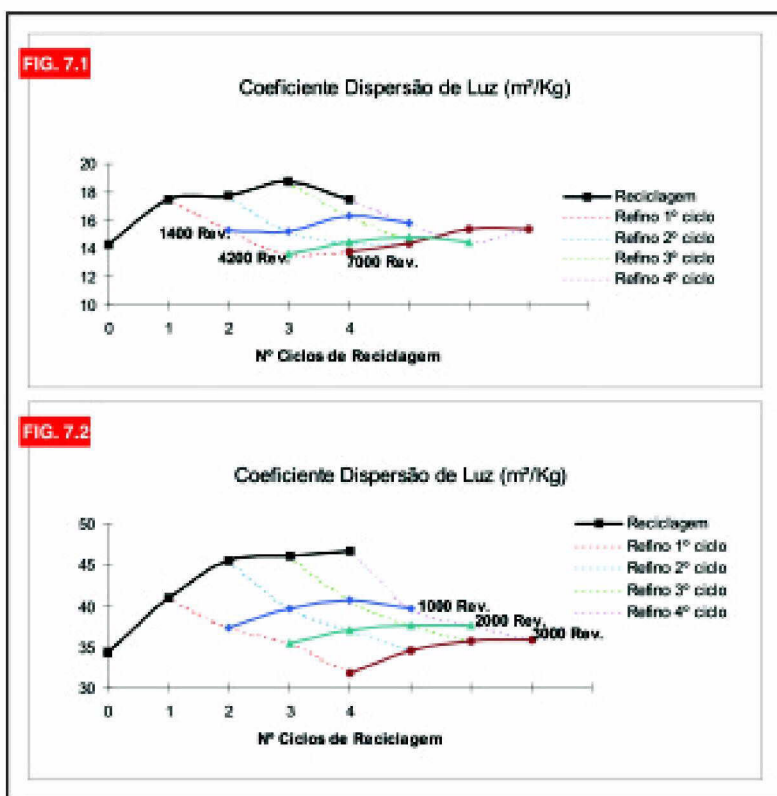


FIGURA 7: Coeficiente Dispersão Luz em função dos ciclos de reciclagem com aplicação de refino em cada ciclo para recuperação da propriedade. (Fig. 7.1- *Pinus*; Fig. 7.2- *Eucalypto*)

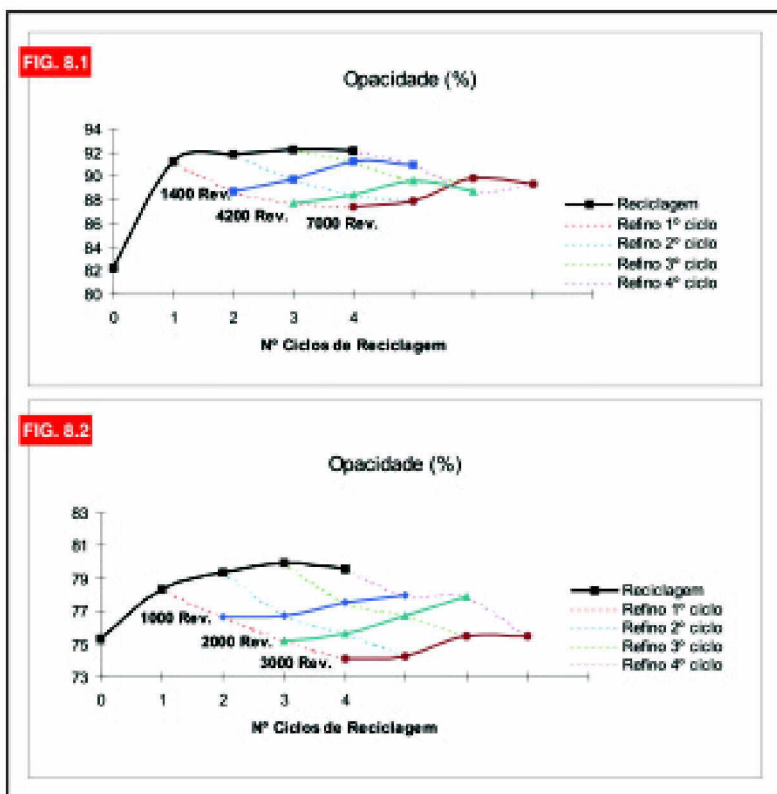


FIGURA 8: Opacidade em função dos ciclos de reciclagem com aplicação de refino em cada ciclo para recuperação da propriedade. (Fig. 8.1- *Pinus*; Fig. 8.2- *Eucalypto*)

tre as fibras, o que vem a reduzir a opacidade e a dispersão de luz.

Durante a reciclagem, a estruturação das fibras na formação do papel favorecerá o aparecimento de superfícies ópticas, devido à falta de ligação inter e intra fibras, levando a um aumento na opacidade e no coeficiente de dispersão de luz. A tendência à estabilização logo no segundo ciclo deve-se, provavelmente, às modificações irreversíveis na estrutura da fibra, que no entanto foi reestruturada com a ação do refino (Figuras 7 e 8). Nota-se, também, que a refinação apresentou uma ação limitada, já que o incremento no número de revoluções ocasionou pequenas reduções nestas propriedades, tendendo a uma certa estabilização. Com exceção para o coeficiente de dispersão de luz em polpa de eucalipto, que apresentou uma queda significativa de cerca de 25% (Figura 7.2). As pequenas alterações entre os tratamentos são melhor observadas em *Pinus*, talvez devido ao fato de suas fibras serem menos favorecidas pela ação do refino.

Cardoso e Adrioni (1998), avaliaram durante 8 ciclos de reciclagem as propriedades ópticas do papel e verificaram incrementos na opacidade, coeficiente de dispersão de luz e amarelecimento. Este fato foi atribuído ao aumento no teor de finos bem como diminuição no comprimento das fibras.

#### 4.8 Teor de Carboidratos:

As hemiceluloses são responsáveis por diversas propriedades na pasta celulósica, contribuem para o entumescimento, a mobilidade interna e o aumento de flexibilidade das fibras. Durante a secagem, as hemiceluloses, por serem adesivas e não cristalinas por natureza, tendem a perder sua elasticidade. Isto tornam-nas inacessíveis à água e aos agentes comuns de entumescimento estendendo estas características às fibras de celulose.

Isto leva a uma redução do potencial ligante e pode ser verificado quando as propriedades físicas do papel decrescem. Com a seca-



**Quadro 4: Teores percentuais de  $\alpha$  e  $\gamma$  Celuloses**

Ciclos de Reciclagem	0 Ciclo*	1º Ciclo	2º Ciclo	3º Ciclo	4º Ciclo
$\alpha$ Celulose	92.2	92.6	93.0	93.1	93.3
$\gamma$ Celulose	6.59	5.95	5.86	5.84	3.99

\* 0 Ciclo: Polpa virgem refinada a 40 °SR

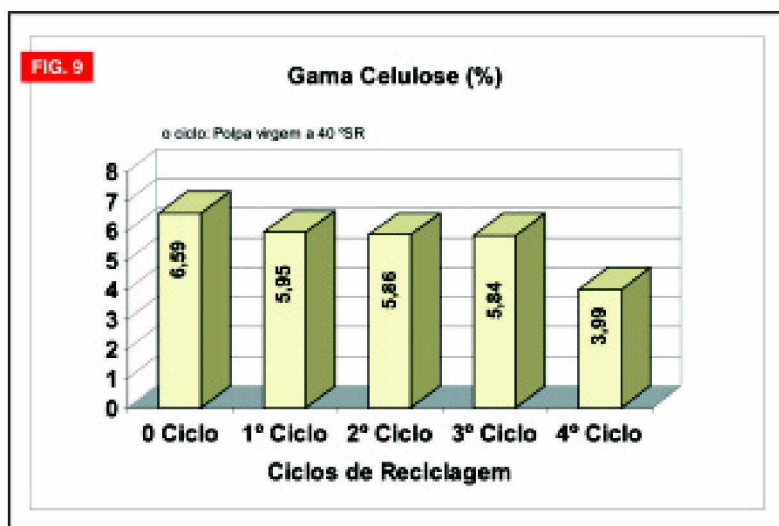


Figura 9- Teor de  $\gamma$  celulose na polpa reciclada de Eucalipto

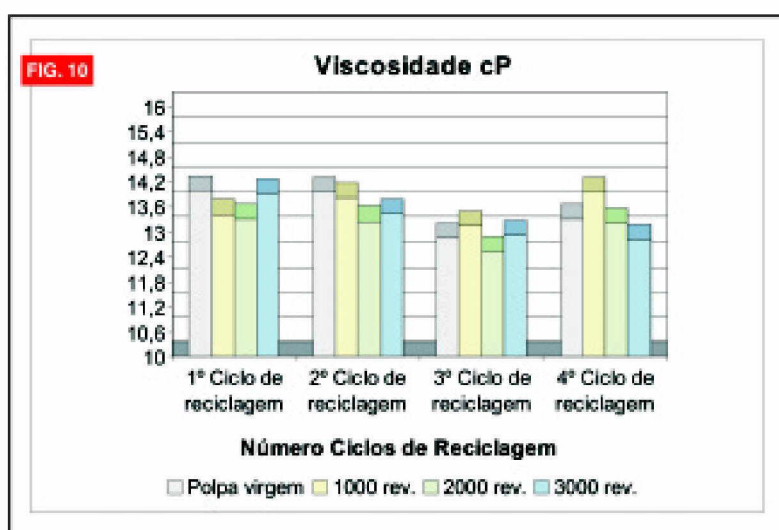


Figura 10: Viscosidades da polpa de Eucalipto em cada ciclo de reciclagem e aos níveis de refino utilizado para recuperação de propriedades

**Quadro 5: Viscosidade cP das polpas obtidas em cada ciclo de reciclagem**

	1º Ciclo de Reciclagem	2º Ciclo de Reciclagem	3º Ciclo de Reciclagem	4º Ciclo de Reciclagem
Polpa virgem	13.99	13.95	12.85	13.32
1000 rev.*	13.42	13.82	13.14	13.96
2000 rev.*	13.32	13.26	12.52	13.21
3000 rev.*	13.93	13.45	12.91	12.82

\* Número. revoluções do moinho PFI

gem, as fibras vão enrijecendo naturalmente sua estrutura com ligações hidrogênio mais fortes, dificultando a ligação uma às outras na formação do papel. No decorrer do processo, também se tornam cada vez mais rígidas e menos plásticas, estando sujeitas a perdas cada vez que voltam ao processo de formação de folhas.

A dissolução de carboidratos e a viscosidade nos permitem ter uma relação quase que direta com as mudanças ocorridas nas propriedades finais da polpa. O mais importante efeito na degradação dos carboidratos é o decréscimo na viscosidade da polpa devido à quebra de suas cadeias. Porém, a queda na viscosidade, para ocorrer em perda de propriedades do papel, dependerá da intensidade da degradação ocorrida. Estudos com hemicelulose mostram que em degradações não muito drásticas a perda destes grupos não implica em mudanças significativas na viscosidade, porém pode resultar em quedas nas propriedades finais do papel (Hamilton e Thompson, 1960).

Portanto, é fácil entender que a perda de carboidratos bem como sua degradação, especialmente hemiceluloses, é bastante prejudicial ao processo de formação do papel refletindo em perda de resistência final do produto.

Neste trabalho, quantificou-se para a polpa de eucalipto os teores de  $\alpha$  e  $\gamma$  celuloses para quatro ciclos de reciclagem e obteve-se uma queda em 40% no teor de  $\gamma$  celulose (Figura 9). Porém, esta degradação não refletiu na viscosidade, onde seus valores não diferiram em nenhum dos ciclos de reciclagem e refino a que foram submetidas as amostras (Figura 10).

A quantificação de carboidratos não foi realizada para a polpa de *pinus*, visto que a precipitação da alfa-celulose não ocorreu na primeira fase do procedimento, o que impossibilitou a determinação dos demais componentes. Mesmo retirando-se a lignina por extração de hemicelulose não houve resultado.



Quadro 6: Índice de retenção de água (WRV, %) das fibras de eucalipto

Polpa de eucalipto	0 Ciclo	1º Ciclo de reciclagem	2º Ciclo de reciclagem	3º Ciclo de reciclagem	4º Ciclo de reciclagem
s/ refino	139	124	123	120	118
1000 rev.	-	143	132	130	128
2000 rev.	-	146	136	134	132
3000 rev.	-	155	141	139	137

0 ciclo: Polpa virgem refinada à 40 °SR

Quadro 7: Índice de retenção de água (WRV, %) das fibras de pinus

Polpa de Pinus	40° SR	1º Ciclo de reciclagem	2º Ciclo de reciclagem	3º Ciclo de reciclagem	4º Ciclo de reciclagem
s/ refino	138	118	108	104	103
1400	-	126	119	114	112
4200	-	142	134	131	123
7000	-	156	143	141	138

0 ciclo: Polpa virgem refinada à 40 °SR

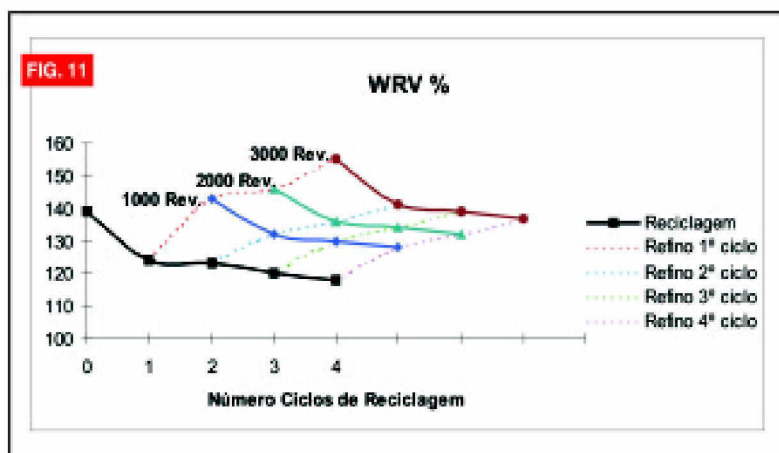


Figura 11: WRV - Índice de Retenção de Água para a polpa de Eucalipto em função dos ciclos de reciclagem e aos níveis de refino

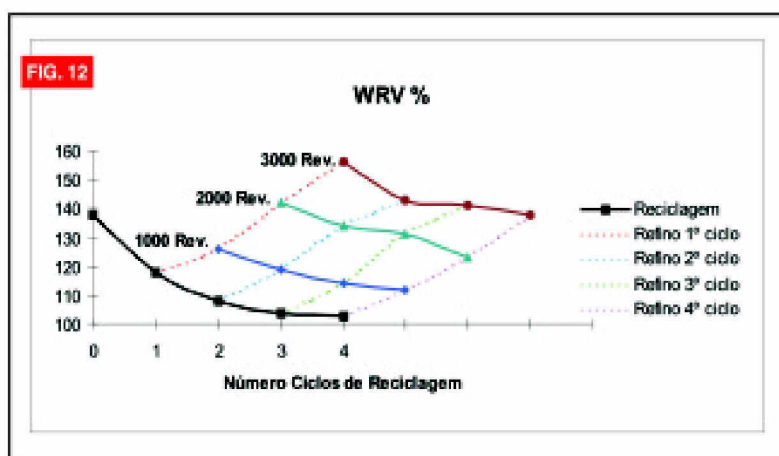


Figura 12: WRV - Índice de Retenção de Água para polpa de Pinus em função dos ciclos de reciclagem e aos níveis de refino

## 5. ÍNDICE DE RETENÇÃO DE ÁGUA (WRV - WATER RETENTION VALUE)

Índice de retenção de água indica a capacidade que as fibras têm de absorver a água em sua estrutura. Sugere-se que a perda na flexibilidade e plasticidade é devida à redução na capacidade de inchamento da fibra como reflexo direto das sucessivas secagens durante o processo de reciclagem.

Sendo assim, as propriedades físicas quando necessitam de maior flexibilidade e inchamento para desenvolverem melhores ligações interfibras serão consecutivamente prejudicadas, reduzindo a resistência físico-mecânica.

Assim como as demais propriedades, a polpa de pinus se mostrou mais susceptível ao processo de reciclagem. Houve um decréscimo mais acentuado logo no primeiro ciclo de 15% em relação à polpa inicial, em um total de 25% ao final do 4º ciclo. Enquanto que na polpa proveniente de eucalipto observou-se 11% em um total de 15% ao final. Nos ciclos subsequentes ao primeiro, quase não houve modificações, tendendo a uma estabilização até o 4º ciclo. O que leva à observação da perda na capacidade de inchamento da fibra.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS:

A influência da reciclagem é mais substancial no primeiro ciclo, mostrando tendências de enrijecimento das fibras com o decorrer da reciclagem. O refino é um método comum de melhorar a capacidade de ligação entre as fibras. Para o caso de fibras recicladas, precauções devem ser tomadas para que seu efeito não seja indesejável, já que as fibras, por se tornarem mais frágeis, são também mais susceptíveis à formação de finos e redução de seu comprimento, refletindo nas propriedades do papel.

Neste estudo, verificou-se que as fibras recicladas respondem bem ao refino, melhorando as propriedades do produto final, no entanto, após atingirem um máximo as





propriedades tendem a se estabilizar, e se esse tratamento for prolongado pode-se levar ao declínio. De um modo geral, a polpa de eucalipto estudada apresentou uma menor perda de propriedades com o desenvolvimento dos ciclos de reciclagem, além de responder melhor ao processo de refinação, necessitando de um menor gasto de energia para que suas propriedades sejam recuperadas, quando comparamos com a polpa de *pinus*.

## 7. BIBLIOGRAFIA CITADA

- 1- ALFREDO, P.O. SAYURI, K. R. Estudo laboratorial das características fibrosas em função dos números de reciclagens. 4º Semana de Papel e Celulose-Anais Curitiba Brasil 26-29 Agosto, 1997.
- 2- ANFPC-Associação Nacional dos Fabricantes de Papel e Celulose. Relatório Estatístico 1998. São Paulo, 1998.
- 3- BUGAGER, SILVIA. O efeito da reciclagem de fibras secundárias sobre as propriedades de papel Kraft. O papel 37(12): p 108-112 (1976).
- 4- BRACELPA- Associação Brasileira de Celulose e Papel - Relatório Anual (1997).
- 5- CARDOSO, G. S., ADRIONI, J. L., Avaliação das propriedades óticas e morfológicas das misturas de fibras em função do número de reciclagem, através da teoria de Kubelka-Munk." 31º Congresso Anual de Celulose e Papel da ABTCP. São Paulo -Brasil, de 19 a 23 outubro de 1998. Anais.
- 6- D'ALMENDA, M. L. O.(Coord.) Celulose e Papel. Tecnologia de fabricação da pasta celulósica. 2ª Ed. São Paulo: IPT, 1988. v.1 p.559.
- 7- ELLIS, R. L. & SEDLACHEK, K. . Recycled versus virgin fiber characteristics: a comparison. Tappi 76(2): p 143-146 ,1994.
- 8- HAMILTON, J. K AND THOMPSON, N. S., Pulp and Paper Can. 1960.
- 9- HORN, R.A. & BORMETT, D.W. Press drying recycled fiber for use in paperboard. Tappi Journal, 68(12):78-83, 1985.
- 10- KWEI, N.L, JACQUES, L.V, QUAN, J. - Effects of recycling on papermaking properties of mechanical and high yield pulps: Part I. TAPPI Journal. 73 (03): p 167-174 (1996).
- 11- MC.COMB, R. e WILLIAMS, J. C. The value of alkaline paper for recycling. Tappi 64(4): p 92 ,1981.
- 12- MOUSA, M. and PASZNER, L. -Fundamentals of strenght lose in recycled paper. Tappi Journal. 77 (09): p 171-179 (1994).
- 13- NEVES, J.M e BLANCO, A.P. -Recuperação de fibras secundárias de materiais com resistência a úmido: cartões para embalagens de leite. O Papel. 50 (01): p 44-52 (1996).
- 14- OLIVEIRA, R.C. e SABIONI, L. - Impacto das variáveis de refino e da adição de fibras virgens na recuperação da qualidade de papéis de Eucalipto decorrente da reciclagem. I Congresso de Tecnologia Papelreira. São Paulo - Brasil de 14 a 16 abril, 1998. Anais.
- 15- PAGE, D. H., SETH, R. S. A note on the effect of fiber strength on the tensile strength of paper. Tappi Journal, Atlanta, GA, v. 71, n. 10, p.182 - 183, 1988.
- 16- THODE, E. F., A. J., e HU, Y. Tappi 38(2): p 88 ,1955.
- 17- WOODWARD, T. W. -Recycled fibers types processing history affect pulp behavior during papermaking. Pulp and Paper (08): p 41-44 (1994)

# Revestimento de superfícies por sistema HVOF

**Você precisa, a gente faz.**



## O QUE É

A Tecnologia HVOF é um processo de aspersão térmica que utiliza uma chama de alta pressão que aquece e projeta partículas de metal em alta velocidade contra uma superfície previamente preparada. Proporciona uma uniforme e densa camada que pode atingir espessuras superiores a 6mm e durezas que excedem a 1.200 vickers. O resultado é uma estrutura com maior resistência ao desgaste, corrosão e abrasão. A RIJEZA disponibiliza mais de 60 ligas diferentes.

## ONDE APLICAR

Os revestimentos aplicados com a tecnologia HVOF podem ser aplicados em variados tipos de peças e equipamentos industriais.

## BENEFÍCIOS

- Altas taxas de adesão (10.000 PSI)
- Elevada resistência à abrasão e ao desgaste
- Grande resistência à corrosão
- Porosidade do revestimento inferior a 2%
- Alta resistência à oxidação
- Processo ecologicamente correto
- Aplicação rápida
- Não altera a estrutura da peça
- Alta resistência à corrosão em altas temperaturas



**RIJEZA**  
metalurgia

São Leopoldo - RS  
rijeza@rijeza.com.br

**51.590.5400**

www.  
**rijeza**  
.com.br

