

Desenvolvimento de propriedades de papel reciclado através de tratamento ultrassônico das fibras e adição de hemiceluloses

Mauro Manfredi; Rubens Chaves de Oliveira
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil.

Resumo

Nesse estudo foi avaliado o potencial de utilização de vibrações ultrassônicas e adição de hemiceluloses para o desenvolvimento de propriedades mecânicas do papel reciclado. Inicialmente foi realizado um estudo onde se objetivou determinar as condições ótimas para realização do tratamento ultrassônico. Foram avaliadas as influências do pH, consistência de massa e tempo de tratamento. A consistência não afetou significativamente os resultados. Por outro lado, quanto maior for o pH e o tempo do tratamento, maiores serão os efeitos nas propriedades. O tratamento ultrassônico se demonstrou eficiente em desenvolver as propriedades de resistência mecânica do papel. A adição de hemiceluloses à polpa resultou em aumento de resistência do papel de forma mais expressiva do que o observado quando a polpa foi refinada em PFI com até 600 revoluções ou ultrassonificada por 20 minutos. Pequenas dosagens de hemiceluloses demonstraram ser suficientes para aumentar significativamente a resistência mecânica do papel. Adicionando hemicelulose à polpa refinada, obteve-se um incremento de até 90% no RCT e 43% na resistência à tração. No caso de polpas não refinadas por 200 revoluções em PFI, os incrementos máximos no RCT e no índice de tração foram de 55% e 37% respectivamente. Para as amostras ultrassonificadas por 20 minutos, os maiores incrementos no RCT e no índice de tração foram de 47% e 36% respectivamente. Os efeitos benéficos da adição de hemiceluloses foram mais expressivos quando a adição foi realizada em polpa refinada. Os efeitos da adição de hemiceluloses em polpa ultrassonificadas foram semelhantes aos observados quando a adição foi feita em polpa não refinada.

Palavras-chave: Reciclagem, ultrassom, hemiceluloses, hemiceluloses, propriedades.

Introdução

Nos últimos 10 anos o consumo de aparas no Brasil aumento mais de 60% [1]. Devido ao grande potencial da utilização de fibras secundárias, a indústria de papel reciclado tem desempenhado grandes esforços para aumentar a qualidade de seu produto e com isso sua participação no mercado papelero. O aprimoramento dos processos e o desenvolvimento de novas tecnologias são cruciais para o sucesso da atividade.

O papel reciclado é um papel de qualidade inferior ao papel produzido com fibras virgem. Durante o processo de fabricação do papel as fibras sofrem algumas modificações em sua estrutura que reduzem sua habilidade de formação da rede fibrosa. Tais modificações resultam em menor grau de colapsamento e de desfibrilamento externo, além da redução da resistência intrínseca das fibras [2]. O colapsamento é muito importante pois aumenta a flexibilidade das fibras resultando numa maior área de contato entre elas durante a formação do papel. Uma maior área de contato entre as fibras, assim como o desfibrilamento externo da parede, favorece a formação de ligações interfibras, elevando com isso a resistência mecânica do papel.

Uma forma de se recuperar a habilidade de formação da rede fibrosa das fibras secundárias é através do refino. No entanto, as fibras secundárias muitas vezes já sofreram refinamentos anteriores, o que diminui a intensidade necessária de tratamento e as torna mais susceptíveis aos efeitos negativos do refino. Mesmo quando realizado em baixas intensidades, o refino das aparas pode causar danos às estruturas das fibras, corte de fibras e produção de finos, reduzindo assim a qualidade do papel. Uma forma de contornar esse problema seria desenvolver uma tecnologia capaz de promover o colapsamento e ativar a superfície das fibras gerando menos danos à sua estrutura.

O uso de vibrações ultrassônicas para desenvolver as propriedades mecânicas do papel já teve sua eficácia comprovada por diversos estudos [3-8]. Alguns estudos demonstraram que a ultrassonificação desenvolve as propriedades de forma similar ao refino mecânico, gerando menos danos estruturais nas fibras [3-5, 8].

O ultrassom promove o desfibrilamento externo das fibras [3-6], aumentando o número de ligações interfibras, e o também o desfibrilamento interno [4-6], facilitando a hidratação das fibras. Comparando com o refino convencional, o tratamento ultrassônico afeta menos o volume específico para um mesmo desenvolvimento de propriedade [3-5,7]. O fato sugere que o ultrassom atua mais ativando a superfície das fibras do que colapsando a estrutura fibrilar.

A ultrassonificação da polpa também é muito atrativa por permitir controlar as modificações nas fibras através da manipulação da frequência e da potência das ondas [8]. Outro ponto positivo dessa tecnologia é que o tratamento pode ser realizado em diversos pontos do processo, como tanques e tubulações, e de maneira relativamente rápida. Além do mais, é uma tecnologia que necessita de equipamentos pouco volumosos, e permite ajustes operacionais tornando a operação flexível quanto ao tipo de material a ser tratado.

O tratamento ultrassônico pode ser uma alternativa para ser utilizado em operação conjunta ou vir substituir o refino mecânico das aparas, pois promovem de forma similar as modificações estruturais das fibras. Essa substituição pode ser interessante por permitir alterar as propriedades do papel de forma mais seletiva, minimizando, ou até mesmo eliminando, alguns efeitos negativos observados quando é realizado o refino mecânico. Dessa forma, a ativação de segmentos de fibras secundárias através da ultrassonificação pode resultar em melhores condições operacionais e qualidade do produto final.

Outra tecnologia que pode ser utilizada para desenvolver as propriedades do papel reciclado é a adição de hemicelulose. As hemiceluloses influenciam significativamente as propriedades fisicomecânicas do papel [9-19]. Quando presentes na superfície das fibras têm um importante papel na formação de ligações interfibras [13,18,19]. Quando presentes na estrutura interna da parede auxiliam na hidratação das fibras facilitando o colapsamento. Além de facilitar o colapsamento, ao favorecer a hidratação da parede as hemiceluloses tornam as fibras mais susceptíveis ao refino, diminuindo assim a intensidade de refino necessária para se atingir determinado valor de propriedade [10,13,19].

Diversos estudos foram realizados visando adicionar hemicelulose à polpa [19-24]. De uma maneira geral, a adsorção de hemicelulose é favorecida pelo uso de altas temperaturas, pH alcalino e elevados tempos de tratamento. No entanto, é possível adicionar hemicelulose à polpa utilizando condições típicas dos processos industriais.

O objetivo desse trabalho foi desenvolver as propriedades de resistência mecânica do papel reciclado através do tratamento ultrassônico de suas fibras secundárias e pela adição de hemiceluloses. Com esse estudo espera-se apresentar a aplicação de duas novas tecnologias que permitam produzir papel reciclado de melhor qualidade.

Materiais e Métodos

Materiais

O OCC (*Old Corrugated Container*) foi escolhido como fonte de fibras. Esse material foi escolhido por ser o tipo de aparas mais consumido no Brasil. A Tabela 1 apresenta algumas características morfológicas do material.

Tabela 1 – Características morfológicas das fibras do material inicial

Material	Comprimento médio (mm)	Largura média (µm)	Coarseness (mg/100m)	Teor de finos (%)
Capa interna	1,46	31,04	15,76	18,63
Capa externa	0,91	32,37	10,66	11,24
Miolo	0,97	32,39	12,71	22,43
OCC completo	1,09	32,01	12,96	19,21

Preparo de massa e formação das folhas

As aparas foram hidratadas por um período de 12 horas em água destilada. Em seguida, o material foi desagregado em um desagregador laboratorial, centrifugado e armazenado em sacos plásticos sob refrigeração adequada, para posterior tratamento e formação das folhas.

Foram formadas folhas com 120 g/m² para os testes de compressão e de 60g/m² para os demais testes, seguindo norma TAPPI 205 sp-95. As folhas foram mantidas em ambiente climatizado com temperatura de 23 ± 1 °C e umidade relativa do ar de 50 ± 2 % para realização dos testes.

Tratamento ultrassônico

O equipamento ultrassônico utilizado foi o Virsonic 475. Esse equipamento tem 475 Watts de potência e gera ondas ultrassônicas com frequência de 20kHz. Entretanto, seguindo as orientações do fabricante, o equipamento foi configurado para trabalhar com apenas 40% de sua potência, o que equivale à 190 Watts.

Em cada operação foram tratados 1L de suspensão fibrosa, dentro de um béquer de 2L. Dessa forma, a quantidade de polpa tratada em cada operação variou quando se modificou a consistência da massa. Todos os tratamentos foram realizados com a temperatura inicial da suspensão em 30°C. O béquer foi acondicionado sobre um agitador magnético a fim de manter a suspensão fibrosa sob agitação constante, e com isso, promover o tratamento homogêneo das fibras. A haste do transdutor ultrassônico foi inserida na suspensão mantendo a sua ponta no centro da suspensão fibrosa.

Inicialmente foram realizados testes preliminares para determinação das condições ótimas de tratamento. Para isso foram testadas faixas de pH, consistência de massa e tempo de tratamento. As consistências testadas foram de 0,5%, 1%, 2% e 4%. Para cada consistência, foram testados os pHs 7 e 10. Todos esses tratamentos foram realizados por 5, 10 e 20 minutos. A escolha das condições de tratamento foi baseada em consulta bibliográfica.

Na parte do experimento onde se estudou a adição de hemicelulose, o tratamento ultrassônico utilizado foi realizado por 20 minutos, com consistência de massa de 3% e pH 8.

Refino em PFI

A polpa foi hidratada e desagregada com as mesmas condições utilizadas para o refino ultrassônico. O refino foi realizado em refinador laboratorial tipo PFI, seguindo norma TAPPI 248 sp-00. Amostras com equivalentes 30 gramas de polpa foram desagregadas com 30000 revoluções no desagregador laboratorial, a uma consistência de 0,8%. A massa foi então drenada até a consistência de 10% e submetida ao refino. Os números de revolução foram determinados a fim de se obter índices de tração semelhantes aos obtidos pela polpa ultrassonificada.

Após o refino, a massa foi desagregada com 10000 revoluções em desagregador laboratorial e a consistência foi corrigida para 0,2% para determinação de grau Schopper-Riegler (°SR) e formação das folhas.

Hemicelulose

A hemicelulose, no caso hemiceluloses, foi obtida de polpa kraft não branqueada de eucalipto através do processo CCE. O equivalente a 300g de polpa seca foi tratada com 240g de hidróxido de sódio e temperatura de 25°C, a uma consistência de 10%. Após o tempo de reação de 30 minutos, a polpa foi centrifugada para coleta do licor rico em hemicelulose.

O licor teve seu teor de hemicelulose quantificado através de espectroscopia. Foi encontrado um teor de 15g de hemicelulose por litro. O licor foi armazenado sob baixas temperatura sem correção de pH, que era de 13,7.

A adsorção de hemicelulose foi feita sempre após o refino ou o tratamento ultrassônico (quando houve algum desses tratamentos). A adição de hemicelulose na polpa se deu através da mistura do licor proveniente do CCE à suspensão fibrosa, sob condições que favoreçam a adsorção desses carboidratos às fibras. Baseado na literatura e no intuito de trabalhar com condições que viabilize a aplicação em indústrias, optou-se por trabalhar sob temperatura de 60°C, pH 8, e com 60 minutos de tratamento. Trabalhou-se com consistência de massa de 3%, sempre mantida sob leve agitação. As dosagens de hemicelulose testadas foram de 1%, 2,5%, 5% e 10% base peso de polpa.

Em uma segunda estratégia foi fixada a dosagem de 10% de hemicelulose e variou-se o número de revoluções em PFI e o tempo de tratamento ultrassônico, a fim de se avaliar os impactos do refino e da ultrassonificação na adsorção de hemicelulose.

Testes físicos e mecânicos

Para realização dos testes em regime de tração foi utilizado o aparelho de testes do tipo Instron-modelo 4204, conforme norma TAPPI T494 om-96, com as seguintes condições de teste: Velocidade de teste de 25 mm/min.; Capacidade da célula de carga de 1000N; Dimensões do corpo de prova de 160 x 15 mm e distância entre garras de 100 mm. O mesmo equipamento foi utilizado para os testes sob regime de compressão. Para determinação do índice de rasgo, arrebentamento e resistência à passagem do ar, foram utilizados, respectivamente, os aparelhos Elmendorf, Mullen e Porosímetro de Gurley. A espessura de folhas foi determinada através de um Micrômetro automático.

Todos os testes foram realizados conforme procedimentos e metodologias padronizadas de acordo com normas técnicas da TAPPI, conforme mostra a Tabela 2.

Para análise estatística dos dados foi utilizado um teste de identidade de modelos. No teste foi adotada uma análise de variância com 95% de probabilidade.

Tabela 2 - Procedimentos analíticos

Procedimentos	Normas
Espessura	TAPPI 551 om-06
Gramatura	TAPPI 410 om-08
Resistência ao arrebentamento	TAPPI 403 om-02
Resistência ao rasgo (Elmendorf)	TAPPI 414 om-04
Resistência à passagem de ar	TAPPI 536 om-07
Resistência a tração	TAPPI 494 om-06
Alongamento	TAPPI 494 om-06
Energia de deformação	TAPPI 494 om-06
Módulo de elasticidade	TAPPI 494 om-06
Resistência à compressão (RCT)	TAPPI 822 om-93
Resistência à compressão (CMT)	TAPPI 809 om-93
Peso específico aparente	TAPPI 220 sp-06
Volume específico aparente	TAPPI 220 sp-06
Resistência de ligações interfibras	TAPPI 541 om-05 (adaptada)

Análises químicas

As análises de carboidratos foram realizadas em equipamento HPLC, seguindo normas internas do Laboratório de Celulose e Papel da Universidade Federal de Viçosa. O procedimento consistiu em realizar uma hidrólise ácida para converter os polímeros em monômeros quantificáveis. Em seguida o material foi filtrado, diluído e analisado em equipamento HPLC.

Análise do material fibroso

A análise do material fibroso consistiu em determinar o teor de finos, *coarseness*, comprimento médio ponderado e largura média ponderada das fibras. Nessa análise, como finos foi considerado todo material com comprimento inferior à 0,07mm. Para o cálculo das dimensões médias das fibras, o software considerou apenas os materiais com comprimento entre 0,07 mm e 3,0 mm. A análise foi realizada com o equipamento Galai CIS-100 e os dados foram processados através do software-*Wshape*.

Foram preparadas suspensões fibrosas na consistência de 0,001%, com água destilada e 2% (base polpa) de agente dispersante. As suspensões foram mantidas em repouso por um período mínimo de 8 horas para hidratação do material fibroso. As análises foram realizadas em triplicata

Resultados e Discussões

Tratamento ultrassônico

Na Figura 1 é possível observar que o tratamento ultrassônico resultou em aumento da resistência à compressão avaliada pelo RCT (*Ring Crush Test*). Comparando os efeitos dos tratamentos quando realizados em pH 7 (Figura 1a) e em pH 10 (Figura 1b), nota-se que o comportamento é semelhante, mas com valores maiores na condição mais alcalina. O efeito do pH fica bastante evidente quando se observa os valores da propriedade sem o tratamento ultrassônico (tempo zero). Em condições alcalinas as fibras se apresentam mais hidratadas, o que as confere menor resistência ao colapsamento. De acordo com um teste de identidade de modelo com 95% de confiança, não houve diferença significativa entre os resultados das diferentes consistências. Portanto, as consistências avaliadas foram representadas por uma única curva comum (Figura 1).

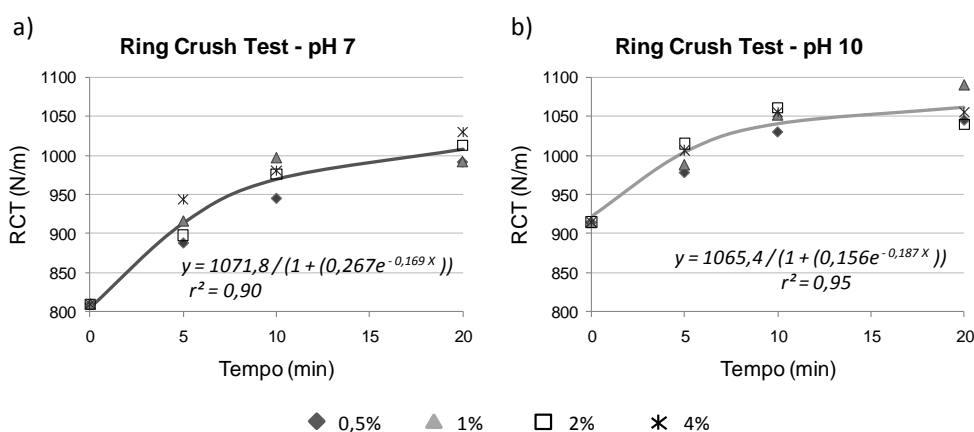


Figura 1. Efeito do tratamento ultrassônico na resistência à compressão RCT quando o tratamento foi realizado em pH 7 (a) e pH 10 (b)

A Figura 2 demonstra que o tratamento ultrassônico aumenta a resistência à tração do papel. Através de um teste de identidade de modelo com 95% de confiança, constatou-se que a consistência de massa não afetou os resultados. Sendo assim, as quatro consistências foram representadas por uma única curva comum. Diferente da consistência, o pH da massa influenciou significativamente o resultado. Quando o tratamento foi realizado na condição de pH 10, houve um pronunciado desenvolvimento do índice de tração nos primeiros minutos de tratamento (Figura 2b). O fato sugere que o pH não apenas desenvolve a propriedade isoladamente (conferindo maior higroscopicidade a parede das fibras intensificando o seu colapsamento), mas também potencializa o tratamento ultrassônico. Ou seja, em pH mais elevados as fibras se tornam mais susceptíveis às ações das ondas ultrassônicas, intensificando os efeitos da ultrassonificação.

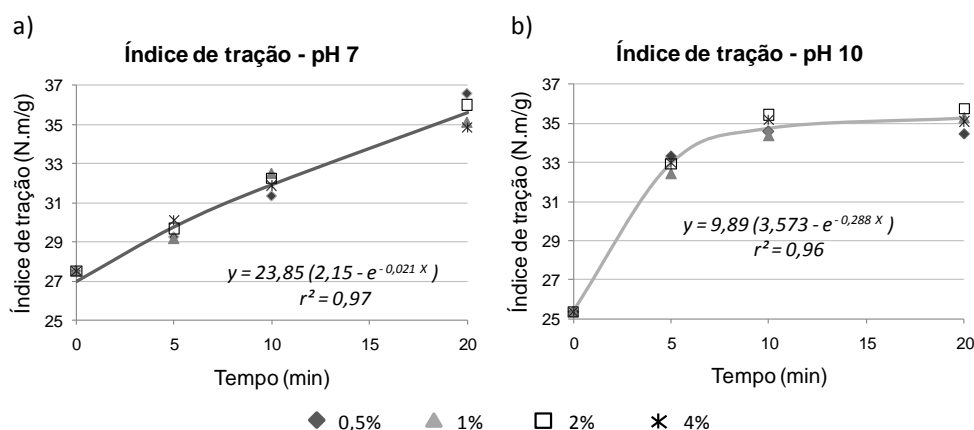


Figura 2. Efeito do tratamento ultrassônico na resistência à tração quando o tratamento foi realizado em pH 7 (a) e pH 10 (b)

A Figura 3 demonstra que o tratamento ultrassônico acarretou num pequeno incremento do índice de rasgo do papel. Esse pequeno aumento deve estar relacionado com a melhor formação da rede fibrosa. O fato de não haver redução do índice de rasgo com o aumento do tempo de tratamento sugere que o tratamento provavelmente pouco afetou a resistência intrínseca das fibras. Ou seja, a ultrassonificação da polpa não gerou danos na estrutura da parede fibrilar que resultassem em significativa redução da resistência intrínseca das fibras.

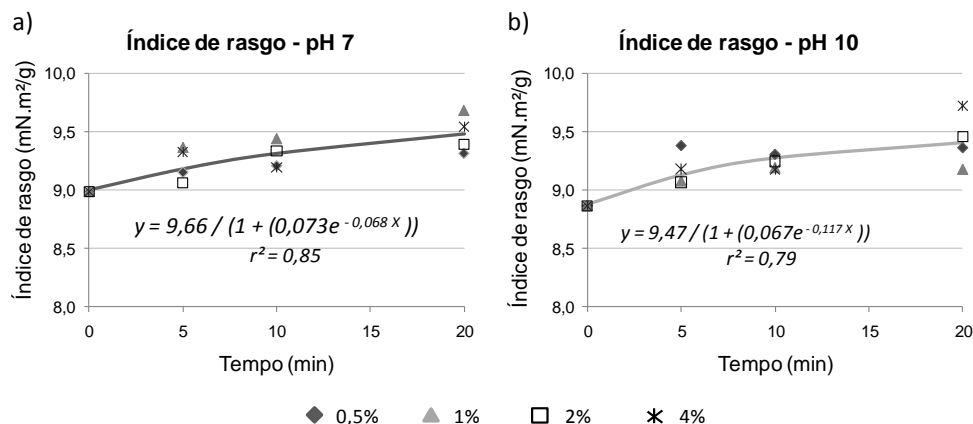


Figura 3. Efeito do tratamento ultrassônico na resistência ao rasgo quando o tratamento foi realizado em pH 7 (a) e pH 10 (b)

Concordando com a literatura [3-8], os resultados desse experimento demonstraram que o tratamento ultrassônico das fibras resulta no desenvolvimento das propriedades físico-mecânicas do papel. No entanto, esse desenvolvimento ocorre de forma diferente do desenvolvimento obtido através do refino convencional. As Figuras 4, 5 e 6 comparam as duas tecnologias, adotando-se o grau Schopper Riegler (°SR) como propriedade referência. Quando comparado com o refino em PFI, a ultrassonificação foi menos eficiente para desenvolver a resistência à compressão (RCT) (Figura 4).

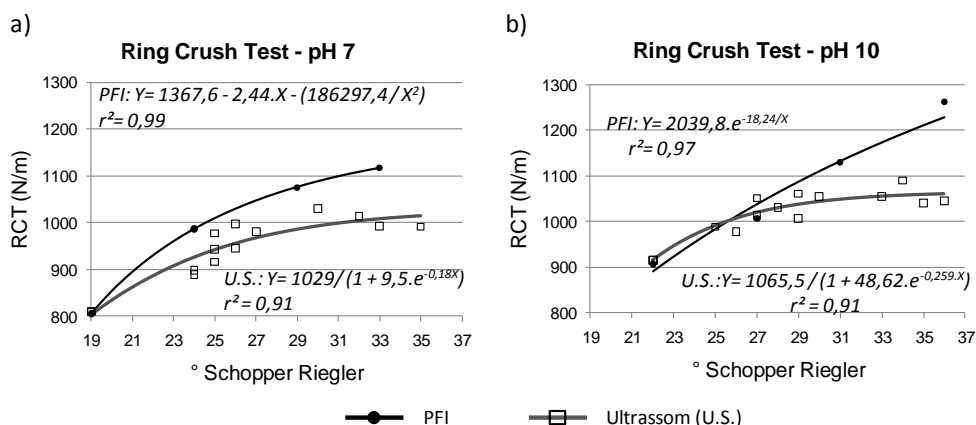


Figura 4. Efeitos do tratamento ultrassônico e do refino em PFI, em pH 7(a) e pH 10(b), no RCT

A Figura 5 demonstra que o refino em PFI eleva mais o índice de tração do que a ultrassonificação, para um mesmo °SR. Entretanto a ultrassonificação também se apresentou eficiente em desenvolver a propriedade.

A Figura 6 compara os efeitos do tratamento ultrassônico e do refino em PFI no volume específico aparente. Observa-se que para um mesmo desenvolvimento do °SR, o tratamento ultrassônico reduziu menos o volume específico aparente, comparado com o refino em PFI. O fato sugere que o tratamento ultrassônico acarreta em menor intensidade de colapsamento das fibras e, ou, menor produção de finos do que o observado através do refino em PFI, já que o volume específico aparente diminui conforme ocorre o colapsamento das fibras e, ou, o aumento do teor de finos da massa.

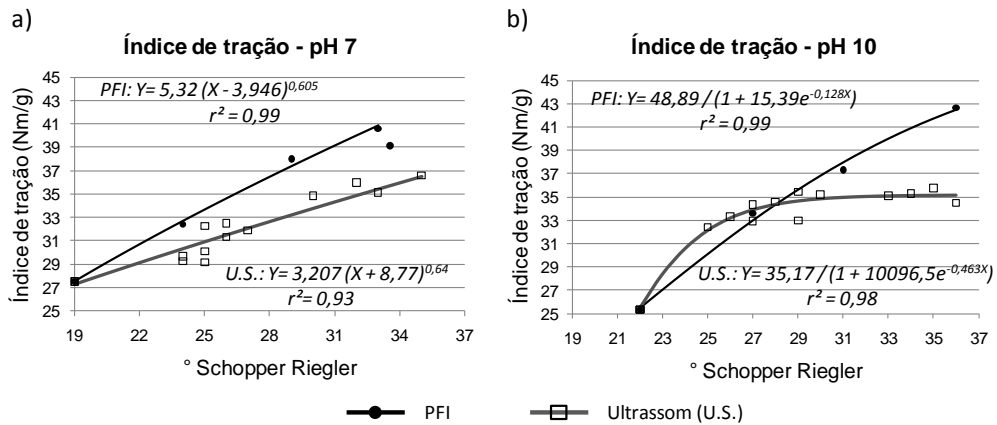


Figura 5. Efeitos do tratamento ultrassônico e do refino em PFI, realizados em pH7 (a) e pH10(b), na resistência à tração

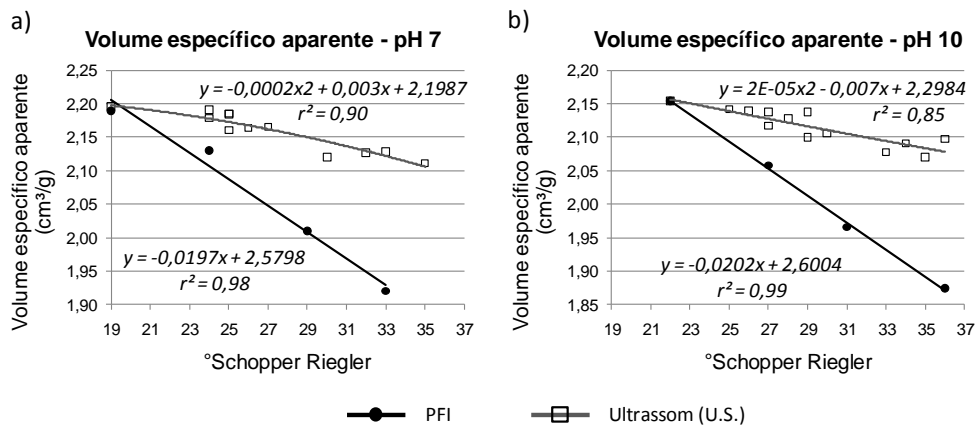


Figura 6. Efeitos do tratamento ultrassônico e do refino em PFI, realizados em pH7 (a) e pH10(b), no volume específico aparente

A análise do teor de finos da polpa demonstrou que, para um determinado valor de °SR, o tratamento ultrassônico produziu mais finos do que o refino em PFI (Figura 7). Portanto, o fato de a polpa ultrassonificada ter maior teor de finos do que a polpa refinada em PFI, e mesmo assim manter um volume específico aparente maior, conclui-se que as fibras ultrassonificadas se apresentavam menos colapsadas do que as fibras refinadas em PFI. Dessa forma, mesmo contendo mais finos, as fibras ultrassonificadas se apresentavam mais rígidas (menos colapsadas), formando uma rede fibrosa menos compacta, resultado no elevado valor de volume específico aparente.

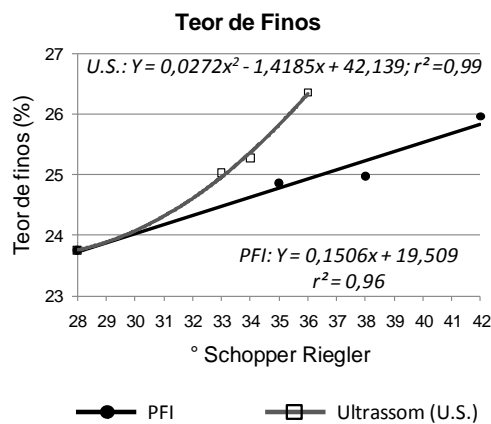


Figura 7. Teor de finos da polpa ultrassonificada e da polpa refinada em PFI

Baseado nos resultados e discussões mencionados anteriormente, a hipótese sugerida aqui é de que o tratamento ultrassônico permite o desenvolvimento das propriedades físico-mecânicas do papel principalmente por promover o desfibrilamento externo das fibras. Essa hipótese é coerente com a literatura [3-7], que reporta que o tratamento ultrassônico promove o desfibrilamento das camadas externas da parede fibrilar, elevando assim as propriedades de resistência e gerando mais finos.

Adição de Hemiceluloses

Os resultados demonstraram que apenas uma parcela das hemiceluloses adicionadas foram retidas na rede fibrosa durante a formação do papel. Esse comportamento era esperado uma vez que o tratamento foi realizado sob condições viáveis para serem utilizadas em indústrias, diferindo ligeiramente das condições ótimas para a adsorção das hemiceluloses.

A Figura 8 demonstra que a polpa refinada e a ultrassonificada retiveram mais hemiceluloses do que a polpa não tratada. Quando submetida a um dos dois tratamentos mencionados acima, as fibras apresentam uma superfície mais desfibrilada, o que aumenta o número de sítios de ligação aptos à adsorverem as hemiceluloses. Além do mais, tais polpas apresentam uma rede fibrosa menos porosa durante a drenagem, o que ajuda a reter as hemiceluloses. Na Figura 8, também é possível observar que com o aumento da dosagem ocorre a redução do percentual de retenção. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que conforme ocorre a adsorção das hemiceluloses, menos sítios de ligação estarão disponíveis para adsorver as hemiceluloses ainda não adsorvidas. Com isso parte das hemiceluloses não conseguem se adsorver às fibras, sendo eliminadas durante a drenagem.

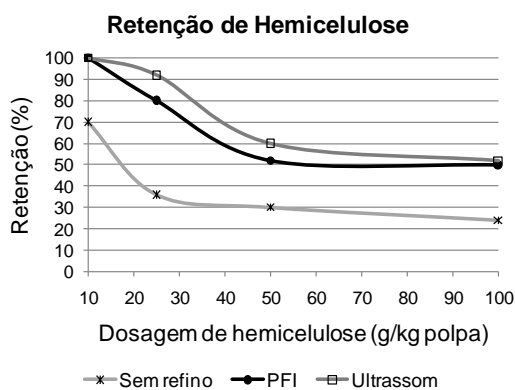


Figura 8. Retenção de hemiceluloses em polpas não refinadas, refinadas e ultrassonificadas

A adição de hemicelulose, mesmo em baixas quantidades, aumenta significativamente a resistência mecânica dos papéis. A Figura 9 demonstra o efeito da adição de hemiceluloses na resistência a tração do papel. A polpa refinada em PFI por 200 revoluções foi a que mais desenvolveu a propriedade, apresentando um incremento até 42%. Interessante notar que mesmo com a dosagem de apenas 1%, a resistência da polpa refinada em PFI, da ultrassonificada, e da não refinada, aumentou respectivamente 18%, 15% e 8%. Os resultados sugerem que não justifica utilizar doses superiores à 5%.

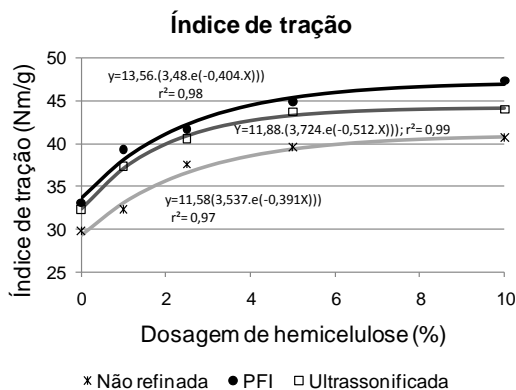


Figura 9. Efeito da adição de hemiceluloses em diferentes dosagens na resistência à tração

A resistência do papel à compressão, avaliada pelo teste de RCT, também foi beneficiada pela adição de hemiceluloses (Figura 10). Nesse caso, a adição de 2,5% de xilana, mesmo com retenção inferior à 40% (Figura 8), resultou num incremento de aproximadamente 46% no RCT da polpa não refinada. Na amostra refinada em PFI foi possível aumentar em até 90% o RCT com a dosagem de 10% de hemiceluloses. Para a amostra tratada com vibrações ultrassônicas, o incremento foi de 27% no RCT quando a dosagem foi de 1%, e 47% quando a dosagem foi de 10%.

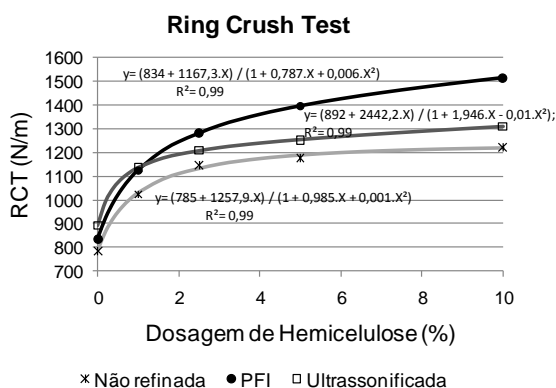


Figura 10. Efeito da adição de hemiceluloses em diferentes dosagens na resistência à compressão

Para avaliar a ação das hemiceluloses como formadoras de ligações interfibras, foi realizado o teste de Resistência de Ligações Interfibras. A resistência do papel quando mensurada através desse teste é influenciada principalmente pela força de ligações interfibras. Os resultados comprovaram que a adição de hemiceluloses aumenta significativamente a força de ligação interfibras (Figura 11). A polpa não refinada e a polpa refinada tiveram um incremento máximo de 48% e 50%, respectivamente, na propriedade avaliada. A polpa ultrassonificada teve um incremento máximo de 43%. Para dosagens de apenas 1%, a propriedade aumentou 27% na polpa tratada com o ultrassom, enquanto que na polpa não refinada e na refinada apenas 17% e 18%, respectivamente. Esse maior incremento observado na polpa ultrassonificada, comparando com a refinada, pode ser explicada pelo fato que a polpa inicialmente apresentava um valor de propriedade menor, sendo assim mais facilmente beneficiada pela adição de hemiceluloses. No caso da polpa não refinada, o incremento inicial foi menor pois houve menor adsorção de hemiceluloses.

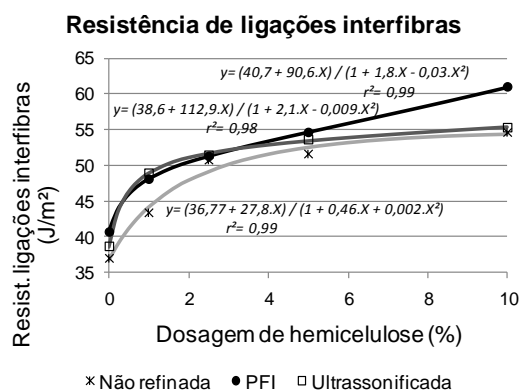


Figura 11. Efeito da adição de hemiceluloses em diferentes dosagens na resistência de ligações interfibras

Uma segunda estratégia utilizada no estudo de adição de hemicelulose foi fixar a dosagem de hemiceluloses e avaliar os efeitos do grau de refino da polpa e do tempo de tratamento ultrassônico na retenção das hemiceluloses.

Figura 12(a) e 12(b) apresentam os efeitos do refino em PFI e da ultrassonificação, respectivamente, na resistência a compressão (RCT) em polpa controle e em polpa enriquecidas com hemiceluloses. Os resultados demonstraram que aumentar o teor de hemiceluloses da polpa desenvolve de forma mais significativa a propriedade do que o refino em PFI por até 600 revoluções, ou o tratamento ultrassônico por até 20 minutos. Enquanto que apenas com a adição de

hemiceluloses obteve-se um aumento de 53% no RCT, o refino em PFI elevou a propriedade em 44% e o tratamento ultrassônico elevou apenas 25%.

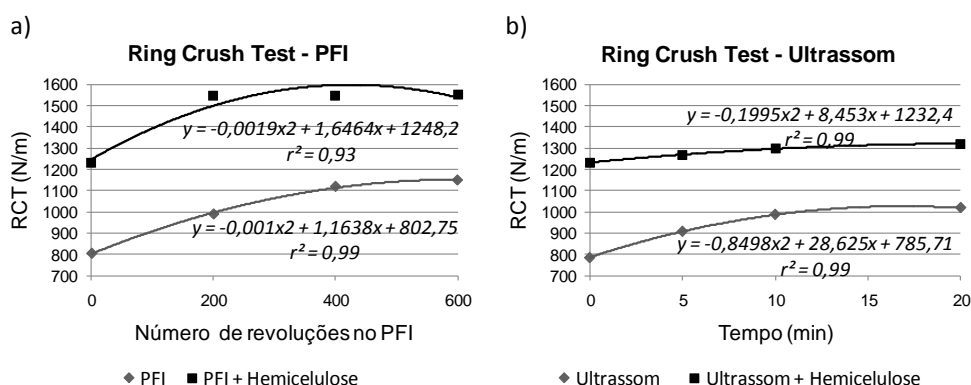


Figura 12. Efeito da adição de hemiceluloses, da ultrassonificação e do refino em PFI no RCT

A figura 13 apresenta o efeito da adição de hemiceluloses na resistência à tração do papel. A adição de hemiceluloses foi tão eficiente quanto o refino em PFI por 600 revoluções (Figura 13a) e mais eficiente que a ultrassonificação por 20 minutos (Figura 13b), para o desenvolvimento da propriedade.

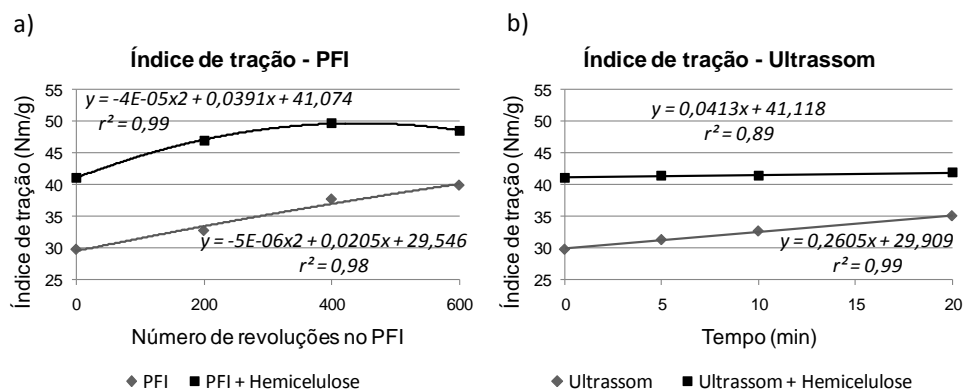


Figura 13. Efeito da adição de hemiceluloses, da ultrassonificação e do refino PFI na resistência à tração

Os resultados mostraram que as hemiceluloses contribuíram significativamente no desenvolvimento das propriedades mecânicas do papel. Esse efeito ocorre principalmente devido a habilidade das hemiceluloses em formar ligações interfibras, o que resulta no aumento das propriedades de resistência do papel. Quando foi realizada a adição de hemiceluloses em polpa refinada por 200 revoluções e polpa refinada por 600 revoluções, os valores das propriedades avaliadas foram o mesmo. O fato demonstra que a adição de hemiceluloses diminui a intensidade de refino necessária para se atingir determinado valor de propriedade.

O desenvolvimento das propriedades resultado da adição de hemiceluloses apresentado nas Figuras 12a e 12b foram praticamente os mesmos quando a adição foi realizada em polpas não ultrassonificadas (tempo zero) ou ultrassonificadas por 5, 10 ou 20 minutos. O fato indica que o tratamento ultrassônico antes da adição de hemiceluloses pouco influencia as propriedades mecânicas do papel.

Conclusões

A tecnologia de ultrassonificação avaliada nesse experimento demonstrou ser eficiente para desenvolver as propriedades do papel reciclado. Os efeitos da ultrassonificação da polpa são intensificados com o aumento do pH da polpa e do tempo de tratamento. A consistência de massa praticamente não afetou o tratamento ultrassônico.

A ultrassonificação da polpa pode substituir o refino convencional ou ser utilizado em conjunto. A substituição do refino convencional pelo tratamento ultrassônico potencialmente resultaria na produção de papel reciclado com maior resistência mecânica para um mesmo valor de volume específico aparente.

Os resultados demonstraram que aumentar o teor de hemiceluloses da polpa através da adição de licor rico em hemiceluloses, contribui significativamente para o desenvolvimento das propriedades do papel reciclado. Baixas dosagens de hemiceluloses são suficientes para aumentar a resistência mecânica do papel. A adição de hemiceluloses à polpa resulta em um desenvolvimento da resistência mecânica do papel semelhante ao desenvolvimento observado através do refino em PFI e mais expressivo do que o decorrente do tratamento ultrassônico da polpa.

A retenção de hemiceluloses é favorecida quando a polpa foi previamente refinada em PFI ou ultrassonificada. Refinar ou ultrassonificar a polpa antes de adicionar as hemiceluloses aumenta a eficiência dessa tecnologia, aumentando assim a sua viabilidade econômica.

Os resultados desse experimento demonstram que submeter as fibras secundárias ao tratamento ultrassônico, ou adicionar hemiceluloses na massa, permite um relevante aumento da qualidade do papel reciclado.

Referências

1. BRACELPA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. Apresenta informações sobre o setor brasileiro de celulose e papel. Disponível em <<http://www.bracelpa.org.br>>. Acesso em: 22 abr. 2009.
2. MINOR, J. L. & ATALLA, R. H. Strength loss in recycled fibers and methods of restoration. In: MATERIAL RESEARCH SOCIETY SYMPOSIUM, 1992, Pittsburgh. **Proceedings...** p. 215-228. 1992.
3. LAINE, J. E.; MACLEOD, J. M.; BOLKER, H. I.; GORING, D. A. I. Application of ultrasound in pulp and paper technology. **Paper Ja Puu: Paper och Trä, Specialnummer**, Helsinki, v. 59, p. 235-247, 1977.
4. LAINE, J. E. & GORING, D. A. I. Influence of ultrasonic irradiation on the properties of cellulosic fibres. **Cellulose Chemistry and Technology**, v. 11, n. 5, p. 561-567, 1977.
5. PEIXOTO, R. S. **Utilização de vibrações ultra-sônicas para o refino de celulose kraft de eucalipto**. 2002. 77 p. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.2009.
6. TATSUMI, D.; TAKASHI, H.; KAWAMURA, S.; MATSUMOTO, T. Ultrasonic treatment to improve the quality of recycled pulp fiber. **Journal of Wood Science**, Japan, v. 46, n. 5, p. 405-409. 2000.
7. WON, J-M; LEE, M-K. Effect of ultrasonic treatment on the pulp properties. **Journal of Korea Tappi**, v. 28, n. 2, 1996.
8. BRODEUR, P. H.; GERHARDSTEIN, J. P. Overview of applications of ultrasonics in pulp and paper industry. In: Ultrasonics Symposium, 1998, Senday. Disponível em: <www.ieeexplore.ieee.org>. Acesso em: 23 de fev. 2010.
9. MILANEZ, A. F.; BARTH, P. P. O.; PINHO, N. C.; VESZ, J. B. V. Influência das hemiceluloses nas propriedades óticas e físico-mecânicas da polpa. In: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL ABTCP, 15, 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, p. 155-170. 1982.
10. MOLINA, E. M. A.; MOGOLLÓN, G.; COLODETTE, J. L. Efecto de las hemiceluloses en la refinabilidad y propiedades físico-mecánicas de pulpa kraft de eucalyptus spp.. In: Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel, 2008, Guadalajara. **Anais...** CIADICYP, 2008.
11. MOLIN, U.; TEDER, A. Importance of cellulose/hemicellulose ratio for pulp strength, **Nordic Pulp and Paper Research Journal**, v. 17, n. 1, p. 14, 2002.

12. SCHÖNBERG, C.; OKSANEM, T.; SUURNÄKKI, A.; KETTUNEM, H.; BUCHERT, J. The importance of xylan for the strength properties of spruce kraft fibres. **Holzforschung**, v. 55, p. 639-644, 2001.
13. ANJOS, O.; SANTOS, A.; SIMÕES, R. Efeito do teor de hemiceluloses na qualidade do papel produzido com fibra de Eucalipto. 5º Congresso Florestal Nacional, In: Actas das comunicações, Rui Silva e Fernando Páscoa Editores. 2005.
14. ANNERGREN, G.; RYDHOLM, S.; VARDHEIM, S. Influence of raw material and pulping process on the chemical composition and physical properties of paper pulps. **Svensk Papperstidning**, v.66, n.6, p. 196-210, 1962.
15. BHADURI, S. K.; GHOSH, I.N.; DEB SARKAR, N. L. Ramie hemicelulose as beater additive in paper making from jute-stick kraft pulp. **Industrial Crops and Products**, v.4, p. 79-84, 1995.
16. SIHTOLA, H. & BLOMBERG, L. Hemicelluloses precipitated from steeping liquor in the viscose process as additives in papermaking. **Cellulose Chem. and Technology**, v.9, n.5, p. 555-560, 1975.
17. SJÖBERG, J.; KLEEN, M.; DAHLMAN, O.; AGNEMO, R.; SUNDVALL, H. Analysis of carbohydrate and lignin in the surface and inner layers of softwood pulp fibers obtained employing various alkaline cooking process. **Nordic Pulp and Paper Research Journal**, v. 17, p. 295-301, 2002.
18. SPIEGELBERG, H. L. The effect of hemicelluloses on the mechanical properties of individual pulp fibres, **Tappi Journal**, Atlanta, v.49, n.9, p. 388, 1966.
19. KÖHNKE, T.; PUJOLRAS, C.; ROUBROEKS, J. P.; GATENHOLM. The effect of barley husk arabinoxylan adsorption on the properties of cellulose fibres. **Cellulose**, v. 15, n. 4, p. 537-546, 2008.
20. AURELL, R. Increasing kraft pulp yield by redeposition of hemicelluloses. **Tappi Journal**, Atlanta, n.48, v.2, 80-84, 1965.
21. HANSSON, J. A. & HARTLER, N. Sorption of hemicelluloses on cellulose fibers. **Svensk Papperstidning**, n.72, v.17, p. 521-530, 1969.
22. LINDER, A.; BERGMAN, R.; BODIN, A.; GATENHOLM, P. Mechanism of assembly of xylan onto cellulose surfaces. **Langmuir**, v.19, n.12, p. 5072-5077, 2003.
23. YLLNER, S. & ENSTRÖM, B. Studies of the adsorption of xylan on cellulose fibres during the sulphate cook. Part. 1, **Svensk Papperstidning**, v. 59, n. 6, p. 229, 1956.
24. YLLNER, S. & ENSTRÖM, B. Studies of the adsorption of xylan on cellulose fibres during the sulphate cook. Part. 2, **Svensk Papperstidning**, v. 60, n. 6, p. 449, 1957.