

Influência da incorporação de celulose microfibrilada nas propriedades de resistência mecânicas do papel

The influence of incorporation of microfibrillated cellulose on mechanical strength properties of paper

Daniele Cristina Potulski¹, Graciela Ines Bolzon de Muniz²,
Umberto Klock³ e Alan Sulato de Andrade⁴

Resumo

A competitividade e o crescimento do setor de celulose e papel vêm fazendo com que as indústrias busquem maneiras de tornar seus processos industriais cada vez mais eficazes. Essa eficácia é conquistada com o desenvolvimento de novas tecnologias, como a nanotecnologia, por meio da utilização de celulose microfibrilada, que ao ser adicionada ao processo de formação do papel visa o incremento de suas propriedades mecânicas, principal objetivo dos produtores do setor papelero. Neste sentido, este estudo tem por objetivo avaliar o efeito da incorporação de celulose microfibrilada ao papel sobre as propriedades de resistência mecânica. A partir da polpa celulósica foram obtidas as microfibrilas que foram caracterizadas por meio da técnica de microscopia eletrônica. Foram confeccionados papéis com grau de refinação 15° e 25° e com adição 1% a 6% de celulose microfibrilada, que foram avaliados através da resistência mecânica a tração, ao rasgo e ao arrebentamento. A adição de celulose microfibrilada aumenta aproximadamente de 41 a 258% a resistência do papel sujeito aos esforços de tração, rasgo e arrebentamento, comprovando a sua significativa influência no aumento das propriedades de resistência mecânica do papel.

Palavras-chave: nanotecnologia, setor de celulose e papel, propriedades de resistência mecânica do papel.

Abstract

The competitiveness and the pulp and paper sector growth have been causing industries to search for ways to make their industrial processes more effective. This effectiveness is achieved with the development of new technologies such as nanotechnology. The use of microfibrillated cellulose added to the paper formation process aims to increase mechanical properties, the main purpose of the paper industry manufacturers. This study aims to evaluate the effect of the incorporation of microfibrillated cellulose into paper on its mechanical properties. The microfibrillated cellulose from the traditional pulp was characterized by electron microscopy technique. The tensile index, burst index and tear index of the papers made with 15° and 25° Schopper-Riegler and adding of 1% up to 6% of microfibrillated cellulose were determined. The tensile index, burst index and tear index increased approximately 41-258% with microfibrillated cellulose addition, confirming a significant influence on the increase of the mechanical properties of the paper.

Keywords: nanotechnology, cellulose and paper sector, paper strength.

INTRODUÇÃO

Considerando o crescimento expressivo do setor de celulose e papel, e o aumento de consumo *per capita* mundial de papel é que se ob-

serva a necessidade cada vez maior do desenvolvimento de novas tecnologias que venham a contribuir para o melhoramento da qualidade dos produtos e o aumento da produção do setor papelero.

¹Doutoranda em Engenharia Florestal. UFPR - Universidade Federal do Paraná. Av. Prefeito Lothário Meissner, 632 - Jardim Botânico - 80210-170 - Curitiba - Paraná. Email: danielepotulski@ufpr.br

²Doutora em Engenharia Florestal. Coordenadora de Pesquisa e desenvolvimento tecnológico da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação. Coordenadora do Laboratório de Qualidade da Madeira. Professora Titular. UFPR - Universidade Federal do Paraná. Av. Prefeito Lothário Meissner, 632 - Jardim Botânico - 80210-170 - Curitiba - Paraná - Brasil. E-mail: gmunize@ufpr.br

³Doutor em Engenharia Florestal. Professor titular. UFPR - Universidade Federal do Paraná. Coordenador do Laboratório de Polpa e Papel e Química da Madeira. Av. Prefeito Lothário Meissner, 632 - Jardim Botânico. - 80210-170 - Curitiba - Paraná. E-mail: klockuer@ufpr.br

⁴Doutor em Engenharia Florestal. Professor titular. UFPR - Universidade Federal do Paraná. Laboratório de Polpa e Papel e Química da Madeira. Av. Prefeito Lothário Meissner, 632 - Jardim Botânico - 80210-170 - Curitiba - Paraná.

Muitas são as formas de aprimorar a qualidade do papel, especialmente a adição de produtos químicos ao processo de produção, como os amidos, visando um papel com melhor entrelaçamento entre as fibras e conseqüentemente o aumento das propriedades de resistência do papel.

As microfibrilas de celulose são incorporadas ao papel com o objetivo de aumentar as propriedades e dar um melhor acabamento ao papel, pois devido ao tamanho microscópico das fibras tem o potencial de ocupar pequenos espaços vazios e, proporcionar um melhor entrelaçamento das fibras, tornando-se um provável aditivo para o papel.

A celulose microfibrilada é uma matéria prima natural e renovável (HENTZE, 2010), uniforme e altamente cristalino (YANO et al., 2007) obtida pelo processo de fibrilação mecânica da celulose, que gera uma desintegração da parede celular da madeira (HENRIKSSON, 2008), e modifica as suas propriedades estruturais e de superfície (YANO; NAKAGAITO, 2004), bem como a sua dimensão.

Existem diferentes processos de obtenção de celulose modificada, entre eles, os métodos mecânicos de homogeneização, microfluidização, micro-moagem (desfibrilação) e *cryocrushing* (maceração em baixíssima temperatura), cada um com suas vantagens e desvantagens (SPENCE et al., 2010) e também os métodos de tratamentos enzimáticos, hidrólises ácidas e carboximetilação (HENRIKSSON, 2008).

O processo de micro-moagem ou desfibrilação mecânica é feito por um moinho que produz a fibrilação externa das fibras, descascando as camadas externas da parede celular e expondo as camadas mais internas (YANO; NAKAGAITO, 2004). Esse fenômeno ocorre porque as fibras de celulose são forçadas por meio de uma abertura entre um disco de pedra rotativo e um disco de pedra estático, que geram forças de cisalhamento que quebram as ligações de hidrogênio (SIRÓ; PLACKETT, 2010). Estes discos em contato com as fibras com auxílio dos sulcos de pressão, emitidos pelo moinho geram a desintegração em subcomponentes estruturais (YANO; NAKAGAITO, 2004; SPENCE et al., 2010).

Segundo Chakraborty et al. (2006 apud WANG et al., 2006); Torvinen et al., 2011 a celulose microfibrilada pode atingir diâmetro na faixa de 0,1-1 µm e comprimento de 5 a 50 µm, Hentze (2010) sugere diâmetro de 5 a 50 nm e comprimento de 10 nm a 100 µm, dependendo

dos parâmetros de preparação, (HENRIKSSON, 2008; WANG; SAIN, 2007; SPENCE et al. 2010), como o número de vezes que o material passa pelo moinho.

Para padronizar podemos definir como celulose microfibrilada (MFC) materiais obtidos através de processos mecânicos e com diâmetro na faixa de 25 a 100 nm e celulose nanofibrilada com diâmetro que pode variar de 5 a 30 nm (NFC) (SEHAQUI et al. 2011).

As propriedades físicas e mecânicas singulares da celulose microfibrilada combinadas com a sua baixa densidade as tornam um material excelente e muito utilizado para reforço de compósitos, como revestimentos e na produção de filmes (WANG; SAIN, 2007).

Uma aplicação potencial para as microfibrilas de celulose está no papel, Ioelovich (2010) estudou a contribuição da adição de nanocelulose obtida por hidrólise na formação da estrutura do papel através das suas propriedades físico-mecânicas.

Na indústria de papel, além de ser utilizada para aumentar a resistência, a celulose microfibrilada é adicionada ao papel para aumentar a densidade de impressão, ou seja, é aplicada como um aditivo superficial (LUU et al., 2011a; LUU et al., 2011b).

Dentro deste contexto este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da incorporação da celulose microfibrilada ao papel, sobre o aspecto das propriedades de resistência mecânica quando sujeito aos esforços de tração, rasgo e arrebentamento.

MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado neste estudo foi a polpa celulósica de *Eucalyptus* spp. branqueada industrialmente com grau de refinação 15° e 25°.

A polpa celulósica de *Eucalyptus* spp. chegou em forma de cartão, com umidade de 11% e foi desintegrada a uma consistência de 1% em desfibrador de disco tipo Bauer.

A partir da polpa celulósica foram obtidas as microfibrilas de celulose por desfibrilação com o moinho Microprocessador Super Masscolloider Masuko Sangyo, o qual consiste em um disco rotatório e um disco fixo com uma abertura ajustável entre eles, para que por meio do contato mecânico as fibras de celulose sejam desfibriladas, ou seja, reduzidas a tamanhos menores.

Os parâmetros para obtenção da celulose microfibrilada estão descritos da Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros para obtenção de celulose microfibrilada.

Table 1. Parameters for obtaining microfibrillated cellulose.

Parâmetro	Referência
Consistência	0,5%
Rotação do moinho	1500 rpm
Distância entre discos do moinho	0,1 mm
Número de passes	30 passes

Para a caracterização da celulose microfibrilada foi utilizada a técnica de microscopia eletrônica de transmissão (MET), no Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Paraná, com auxílio de um microscópio eletrônico de transmissão da marca Joel, modelo JEM 1200EXII Electron Microscope (600 mil X).

A confecção das folhas de papel foi realizada seguindo as normas ISO 5269/2 e T205 sp-02, em uma estação formadora tipo Rapid-Köethen.

As folhas foram formadas com grau de refino de 15° e 25° SR (Schopper-Riegler), com incorporações de celulose microfibrilada nas proporções de 0 a 6% para cada grau, totalizando 14 tratamentos.

As propriedades do papel avaliadas foram: propriedades mecânicas (resistência à tração - T404-om92, ao arrebentamento - T403-om02 e ao rasgo - T414-om98).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A celulose microfibrilada foi obtida e pode ser observadas por meio das imagens de microscopia eletrônica de transmissão da Figura 1.

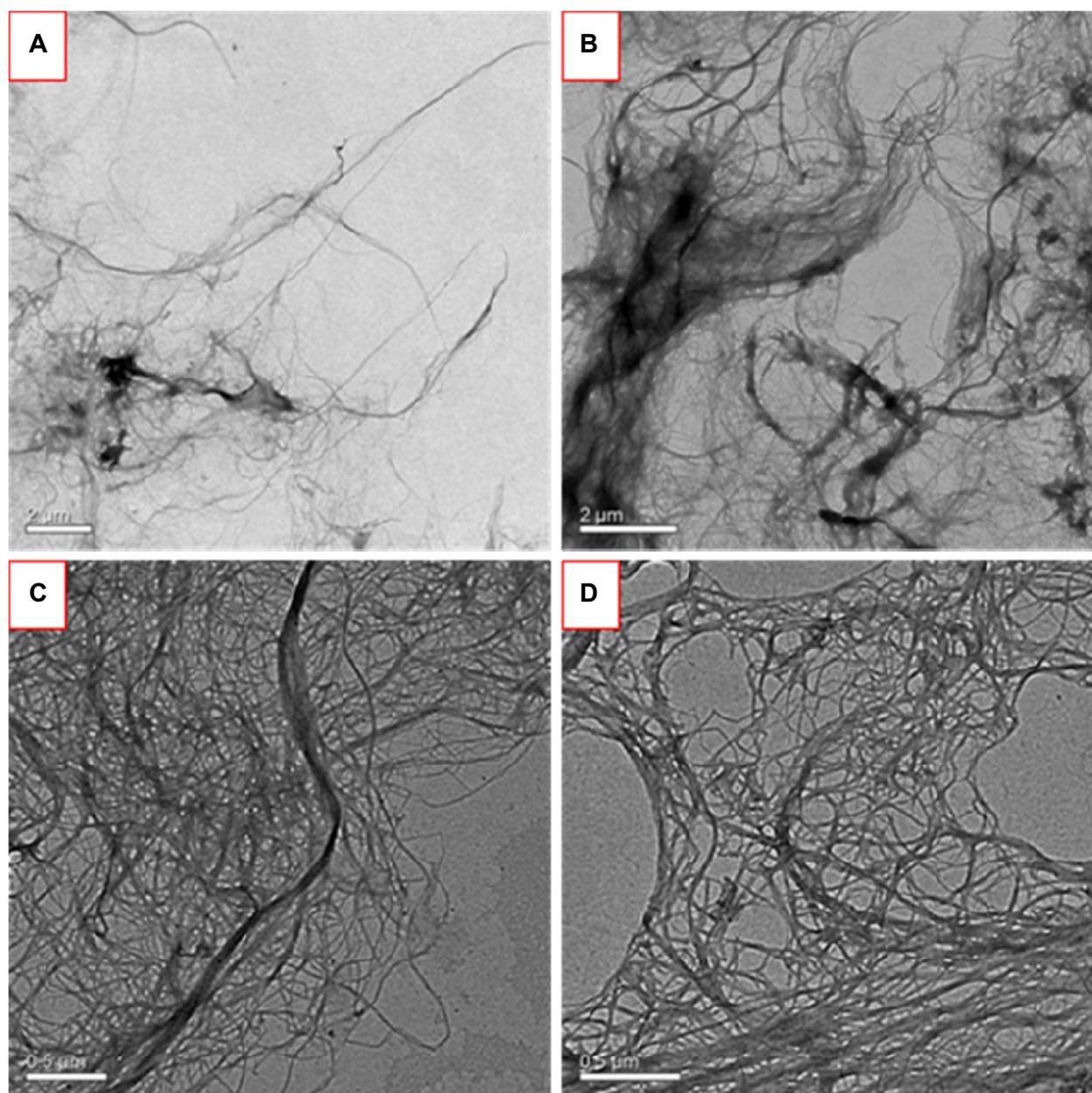


Figura 1. Micrografia da celulose microfibrilada com microscopia eletrônica de transmissão: A) Aumento 8000x – escala: 2 μm B) 12000x – escala: 2 μm C) 40000x – escala: 0,5 μm D) 50000x – escala: 0,5 μm (120 kV)
Figure 1. Micrograph of microfibrillated cellulose with transmission electronic microscopy: A) Increase 8000x – scale: 2 μm B) 12000x – scale: 2 μm C) 40000x – scale: 0,5 μm D) 50000x – scale: 0,5 μm (120 kV).

É possível observar por meio da Figura 1^{(c)(d)}, e com auxílio da escala de 0,5 µm (500 nm) que a celulose microfibrilada obtida pelo processo de microfibrilação mecânica possui largura inferior a 500 nm, ou seja, está na faixa definida para celulose microfibrilada descrita por Sehaqui et al. (2011) de 25 a 100 nm.

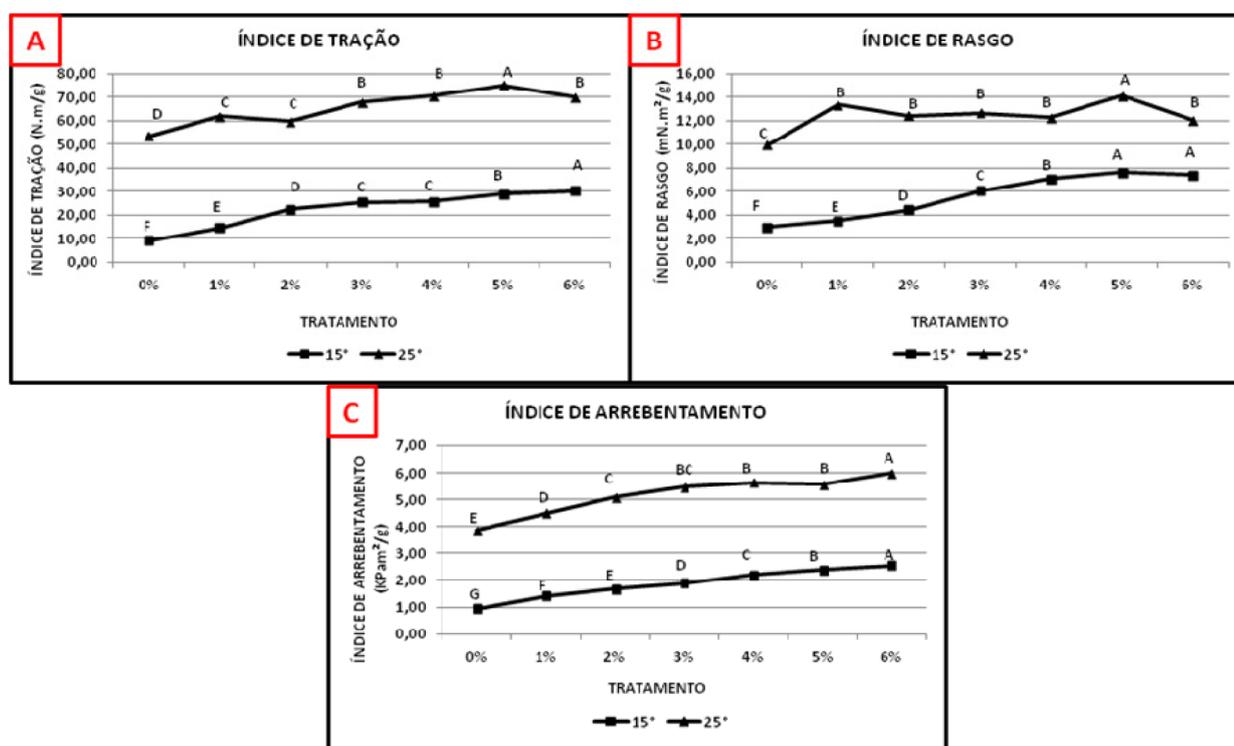
A Figura 2 apresenta o comportamento das propriedades de resistência mecânica do papel sujeito a incorporação de celulose microfibrilada e ao processo de refino.

Para a propriedade de resistência a tração, Figura 2^a, observa-se que o índice de tração variou de 8,51 a 75,60 N.m/g com o tratamento de refino e a incorporação de celulose microfibrilada.

A propriedade de tração é influenciada pelo comprimento das fibras e, principalmente, pelo tratamento de refino, ligação entre as fibras e pela formação e estrutura da folha (FERREIRA, 2008), aspectos que justificam a tendência de aumento de resistência da folha de papel com o tratamento de refino e também com a adição da celulose microfibrilada. Isso ocorre devido às características da celulose microfibrilada que tem grande capacidade de ligação entre as fibras, promovendo assim uma melhor formação e folhas mais homogêneas.

O aumento mais significativo para a resistência à tração foi devido ao processo de refino, mas comparando os tratamentos, é possível verificar que a incorporação da celulose microfibrilada ao material com grau de refinação 15°, aumento de 258%, foi mais representativa do que a incorporação ao material com grau de refinação 25°, aumento de 41%. Isso se deve ao fato de que a combinação dos tratamentos de refino e incorporação de celulose microfibrilada gera uma grande quantidade de finos, não permitindo um aumento de maior significância na resistência. Portanto a combinação destes dois tratamentos deve ser estudada a fim de encontrar um equilíbrio entre a realização da etapa de refino e a adição de celulose microfibrilada.

Essa tendência de equilibrar os tratamentos pode ser visualizada quando comparado os resultados obtidos neste estudo com os resultados apresentados por Milanez et al. (2008) em um estudo com celulose branqueada de *Eucalyptus*. Os autores encontraram índice de tração de 74,2 Nm/g para 35,2° SR e 76,2 Nm/g para 39,3° SR, enquanto que neste estudo foi obtido índice de tração de 75,60 Nm/g para 25° SR e adição de 5% de celulose microfibrilada. Sendo assim, com a adição da celulose microfibrilada é possível reduzir o tempo de refino, tornando o processo mais rápido.



Nota: As letras correspondem ao teste de médias. Letras iguais significam médias estatisticamente iguais, de acordo com o Teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

Figura 2. Valores médios das propriedades de resistência mecânica do papel: A) Índice de tração B) Índice de rasgo C) Índice de arrebentamento.

Figure 2. Mean values of strength properties of the paper: A) Tensile properties of paper and paperboard B) Internal tearing resistance of paper C) Bursting strength of paperboard and linerboard.

González et al. (2012) desenvolveram um estudo de incorporação de celulose nanofibrilada obtida por uma combinação de tratamento químico e um processo mecânico de homogenizador de alta pressão, a polpa celulósica de *Eucalyptus* não refinada. Os autores encontraram valores médios para o índice de tração de 31,9 Nm/g para adição de 3% de celulose nanofibrilada e 42,8 Nm/g para adição de 6%, valores superiores aos obtidos neste estudo. Essa diferença pode ser explicada devido às condições diferenciadas de obtenção da material nanocelulósico, além de fatores relacionados ao processo de incorporação e intrínsecos à polpa celulósica primária.

Analisando a propriedade de resistência ao rasgo, descrita através do índice de rasgo, Figura 2^B, observa-se que houve uma variação de 2,88 a 13,86 mN.m²/g, com a adição da celulose microfibrilada e o tratamento de refino.

Alguns fatores influenciam a resistência ao rasgo, entre eles a quantidade de fibras e a resistência da ligação entre elas e, principalmente, o refino e o comprimento das fibras (FERREIRA, 2008). São esses fatores que justificam a combinação do processo de refino e a adição da celulose microfibrilada não apresentarem resultados tão relevantes quanto aos observados para o índice de tração.

O aumento mais significativo para a resistência ao rasgo foi devido ao processo de refino, mas comparando os tratamentos, é possível verificar que a incorporação da celulose microfibrilada ao material com grau de refinação 15°, gerou um de incremento 158% na resistência, aumento esse, significante estatisticamente, visto que foram observados 6 grupos de médias diferentes para esse tratamento. Já para a incorporação ao material com grau de refinação 25°, o aumento foi de apenas 41%, não sendo estatisticamente tão significante, já que foi obtido apenas 3 grupos de médias diferentes.

Esse menor incremento observado no índice de rasgo para adição da celulose microfibrilada no tratamento com grau de refino 25°, como visto para o índice de tração, deve-se ao fato, de a combinação da adição do material micro e o tratamento de refino gerar grande quantidade de finos.

Ferreira et al. (2006) observaram valor médio de índice de rasgo de 10,73 mNm²/g a 40,47° SR para papéis de clones de *Eucalyptus*, valor inferior ao obtido neste estudo para papéis feitos a 25° SR com adição de 1% de celulose microfibrilada.

A resistência ao arrebentamento, popularmente conhecida como resistência ao estouro, é apresentada através do índice de arrebenta-

mento, Figura 2^C, e apresentou uma variação de 1,002 a 6,020 KPam²/g. Isso significa uma tendência de crescimento da resistência com a adição da celulose microfibrilada e com o tratamento de refino, mesma tendência, visivelmente, observada para o índice de tração.

A provável justificativa para que a tendência observada para a resistência ao arrebentamento tenha sido semelhante à observada para a resistência a tração é que as duas propriedades sejam afetadas pelos mesmos fatores, principalmente, a capacidade de ligação entre as fibras, o principal entre eles. Outros fatores que podem afetar essas propriedades são o comprimento das fibras, o processo de refino e a formação da estrutura da folha (FERREIRA, 2008).

O aumento mais significativo para a resistência ao arrebentamento foi devido ao processo de refino, mas comparando os tratamentos, é possível verificar que a incorporação da celulose microfibrilada ao material com grau de refinação 15°, gerou um incremento de 156% na resistência, aumento esse, significante estatisticamente, visto que foram observados 7 grupos de médias diferentes para esse tratamento. Já para a incorporação ao material com grau de refinação 25°, o aumento foi de apenas 55%, mas foi estatisticamente muito significativo, já que foi possível obter pelo menos 5 grupos de médias diferentes.

González et al. (2012) observaram valor médio de índice de arrebentamento de 2,2 KPam²/g para polpa branqueada de *Eucalyptus* de 29° SR e incorporada com 3% de celulose nanofibrilada e 2,9 KPam²/g para 6% de incorporação e 45° SR, valores inferiores aos obtidos neste estudo.

As diferenças de resultados observadas devem-se, provavelmente, pelo fato da celulose microfibrilada ser obtidas por métodos diferentes, e conseqüentemente terem dimensões diferentes, além de variações intrínsecas dos processos e da matéria primária, pois quando estudamos celulose, tratamos de um material que possui características variáveis, porque é proveniente de processos de polpação de madeira.

Milanez et al. (2008) encontraram para o índice de arrebentamento valor médio de 5,40 KPam²/g para 39,3° SR e 5,19 KPam²/g para 35,2° SR, enquanto que neste estudo foi obtido 5,18 KPam²/g para 25° SR e incorporação de apenas 2% de celulose microfibrilada, comprovando, novamente, que este tipo de tratamento pode promover um incremento significativo nas propriedades de resistência mecânica do papel, mesmo com a redução do tempo de refino.

Diante disso, observamos que o tratamento sugerido neste estudo influenciou, significativamente, nas propriedades de resistência mecânica do papel, porém deve ser considerado que a incorporação da celulose microfibrilada ao papel deve ser realizada ponderando alguns parâmetros de grande relevância, como a quantidade a ser adicionada e o grau de refinação inicial da folha.

CONCLUSÕES

Quanto às propriedades de resistência mecânica, resistência à tração, ao rasgo e ao arrebentamento, estas foram influenciadas tanto pelo processo de refino quanto pela adição da celulose microfibrilada.

A resistência à tração foi a propriedade mecânica que sofreu maior influência pela adição da celulose microfibrilada, com aumento de 258% para o tratamento sem refino e 41% para o tratamento com refino, comprovado estatisticamente pelo teste de médias.

A resistência ao rasgo também teve um aumento mais significativo para a adição da celulose microfibrilada a polpa não refinada, 158%, do que para polpa refinada, 41%.

A resistência ao arrebentamento demonstrou a mesma tendência de crescimento com a adição da celulose microfibrilada observado para a resistência a tração, apresentando aumento de 156% para o tratamento sem refino e 55% para o tratamento com refino, comprovado estatisticamente pelo teste de médias.

A utilização da celulose microfibrilada no processo de fabricação do papel apresentou-se tecnicamente viável, podendo ser apresentada como um provável aditivo ao processo.

A combinação controlada do tratamento de refino com a incorporação da celulose microfibrilada no processo de fabricação do papel apresentou-se tecnicamente viável.

As microfibrilas de celulose podem ser empregadas com o objetivo de desenvolver novos produtos ou, ainda, como base para melhorar a qualidade de suas propriedades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FERREIRA, C. R.; JUNIOR, M. E.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C.; GOMIDE, J. L.; CARVALHO, A. M. L. Avaliação tecnológica de clones de eucalipto: parte 2 - qualidade da celulose branqueada Kraft para papel de imprimir e escrever. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n. 71, p. 09-18, 2006.

FERREIRA, P. **Propriedades do papel**. 2008. Disponível em: < http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/18_Propriedades%20do%20Papel.pdf > Acesso em: 10 jan. 2014.

GONZÁLEZ, I.; BOUFI, S.; PÈLACH, M. A.; ALCALÀ, M.; VILASECA, F.; MUTJÉ, P. Nanofibrillated Cellulose as paper additive in Eucalyptus pulps. *Nanocellulose paper additive, Bioresources*, n. 7, v. 4. p. 5167-5180, 2012.

HENRIKSSON, M. **Cellulose nanofibril networks and composites: preparation, structure and properties**. American Chemical Society Publications. 2008. Disponível em: < https://www.kth.se/polopoly_fs/1.151407!/Menu/general/column-content/attachment/Henriksson_PhD.pdf >. Acesso em: 10 jan. 2014.

HENTZE, H. P. **From Nanocellulose Science towards Applications**. VTT – Technical Research Center of Finland. *PulPaper*, 2010. Disponível em: http://www.vtt.fi/files/events/PulPaper10/NFCApplications_HPH.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2014.

IOELOVICH, M. Structure and properties nano-particles used in paper compositions. In: *TECNICELPA CONFERENCE AND EXHIBITION*, 21, 2010, Lisboa. *Anais...* Lisboa: [Sn], 2010.

LUU, W. T.; BOUSFIELD, D. W.; KETTLE, J. **Application of nano-fibrillated cellulose as a paper surface treatment for inkjet printing**. *PaperCon*, 2011a. Disponível em: < <http://www.tappi.org/content/events/11papercon/documents/212.517.pdf> >. Acesso em: 10 jan. 2014.

LUU, W. T.; RICHMOND, F.; BILADEAU, M.; BOUSFIELD, D. W.; Nano-fibrillated cellulose as a paper surface treatment for inkjet printing. In: *TAPPI INTERNATIONAL CONFERENCE ON NANOTECHNOLOGY FOR RENEWABLE MATERIALS*. 2011, Washington. *Proceedings...* Washington: Tappi, 2011b. CD ROM

MILANEZ, A. F.; COLODETTE, J. L.; CARVALHO, A. M. M. L. Condições ótimas para branquear polpa kraft de eucalipto com uma sequência de três estágios. *Scientia Florestalis*. Piracicaba, v. 36, n. 78, p. 105-113, 2008.

SEHAQUI, H.; ALLAIS, M.; ZHOU, Q.; BERGLUND, L. A. Wood cellulose biocomposites with ?brous structures at micro- and nanoscale. *Composites Science and Technology*, n. 71, n. 3, p. 382-387, 2011.

SIRÓ, I.; PLACKETT, D. Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: a review. **Cellulose**, n.17, n. 3, p.459-494, 2010.

SPENCE, K. L.; VENDITTI, R. A.; HABIBI, Y.; ROJAS, O. J.; PAWLAK, J. J. Aspects of Raw Materials and Processing Conditions on the Production and Utilization of Microfibrillated Cellulose. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF NANOTECHNOLOGY FOR THE FOREST PRODUCTS INDUSTRY. TECHNICAL ADVANCES AND APPLICATIONS IN NANOTECH PRODUCTS. Otaniemi, Espoo, 2010. < Disponível em: <http://www.tappi.org/content/events/10nano/papers/24.1.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2014.

TORVINEN, K.; HELIN, T.; KIISKINEN, H.; HELLÉN, E.; HOHENTHAL, C.; KETOJA, J. Nanofibrillated cellulose as a strength additive in filler-rich SC paper. In: TAPPI INTERNATIONAL CONFERENCE ON NANOTECHNOLOGY FOR RENEWABLE MATERIALS, 2011, Washington. **Proceedings...** Washington: Tappi, 2011. CD ROM

WANG, B.; SAIN, M. Isolation of nanofibers from soybean source and their reinforcing capability on synthetic polymers. **Composites Science and Technology**, v. 67, n. 11-12, p. 2521-2527, 2007.

WANG, S.; CHENG, Q.; RIALS, T. G.; LEE, S. H. Cellulose Microfibril/Nanofibril and Its Nanocomposites. In: PACIFIC RIM BIO-BASED COMPOSITES SYMPOSIUM, 8, Tennessee. **Proceedings...** Tennessee: Forest Products Center, University of Tennessee, 2006.

YANO H.; NAKAGAITO A. N.. The effect of morphological changes from pulp fiber towards nano-scale fibrillated cellulose on the mechanical properties of high-strength plant fiber based composites. **Applied Physics A – Materials Science & Processing**, v. 78, n. 4, p. 547-552, 2004.

YANO, H.; NAKAGAITO, A. N.; IWAMOTO, S. Nano-fibrillation of pulp fibers for the processing of transparent nanocomposites. **Applied Physics A – Materials Science & Processing**, v. 89, n. 2, p. 461-466, 2007.

Recebido em 10/10/2013

Aceito para publicação em 16/04/2014

