

O efeito da refinação nas distribuições da dimensão transversal de fibras de polpas de espécies de eucalipto

The effect of refining on fiber transverse dimension distributions of eucalyptus pulps species

Autores/Authors*: Tiro Pulkkinen¹
Juha Fiskari²
Juhani Aittamaa¹

Palavras-chave: Distribuição da dimensão transversal, FiberLab[®], propriedades técnicas do papel, refinação, valor médio

RESUMO

Foi estudado o efeito da refinação nas distribuições da dimensão transversal das fibras de polpas de diversas espécies de eucalipto. O método tradicional, baseado em valores médios das propriedades das fibras, foi ampliado para uma análise da distribuição, tendo sido discutido o efeito da refinação sobre o desvio padrão e a assimetria. Algumas polpas de espécies de eucalipto apresentaram nítidas alterações em seu desvio padrão e na assimetria das distribuições da largura das fibras e da espessura da parede das fibras. Além disso, foram examinados o efeito da secagem nas características das fibras e a reação à refinação de espécies secadas de eucalipto. Foram discutidas as distribuições obtidas com um analisador automático de fibras (Kajaani FiberLab[®]) e as suas características de distribuição e considerados os aspectos característicos da técnica de medição corrente. Com uma análise de imagens em rápido processo de aperfeiçoamento, podem ser obtidas informações úteis para estudar o efeito de distribuições das fibras sobre as propriedades técnicas de papéis de fibras de polpas de eucalipto.

Keywords: FiberLab[®], mean value, refining, technical properties of paper, transverse dimension distribution

ABSTRACT

The effect of refining on the fiber transverse dimension distributions of several eucalyptus pulp species was studied. The traditional approach based on mean values of fiber properties was broadened to distribution analysis, and the effect of refining on standard deviation and skewness was discussed. Some eucalyptus pulp species showed distinct changes in their standard deviation and the skewness of fiber width and fiber wall thickness distributions. In addition, the effect of drying on fiber characteristics and the refining response of dried eucalyptus species were examined. The distributions obtained with an automatic fiber analyzer (Kajaani FiberLab[®]) and their distribution characteristics were discussed and the characteristic features of the current measuring technique were considered. With rapidly improving image analysis, useful information can be obtained to study the effect of fiber distributions on the paper technical properties of eucalyptus pulp fiber.

*Referências dos Autores: / Authors' references:

- 1 - Departamento de Engenharia Química, Kemistintie 1 D, Universidade de Tecnologia de Helsinque, Finlândia - E-mail: iiro.pulkkinen.fi
- 1 - Department of Chemical Engineering, Kemistintie 1 D, Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland - E-mail: iiro.pulkkinen.fi
- 2 - Oy Metsä-Botnia Ab, Joutseno, Finlândia
- 2 - Oy Metsä-Botnia Ab, Joutseno, Finland

INTRODUÇÃO

A refinação de baixa consistência (LC) foi usada por longo tempo para melhorar a resistência à tração do papel, mas os mecanismos que esclarecem por que a refinação produz essas melhorias ainda não foram plenamente compreendidos, constituindo, portanto, um tópico de pesquisa corrente. Os efeitos primários da refinação são a criação de novas superfícies, a criação de novas partículas e alterações estruturais das fibras (Hietanen e Ebeling, 1990). As principais alterações na morfologia das fibras, que ocorrem em função da refinação, foram estudadas a fundo por Page (1989).

A refinação é uma das operações unitárias mais importantes na fabricação de papel, uma vez que modifica as propriedades das fibras e, portanto, praticamente todas as propriedades do produto final. Algumas propriedades do papel (tais como a resistência à tração) melhoram à medida que as fibras são refinadas adicionalmente, ao passo que algumas outras propriedades (tais como a opacidade) se deterioram. Para pares de propriedades críticas, tais como resistência à tração e opacidade, é preciso obter um meio-termo para assegurar o melhor resultado possível, tendo em vista o processamento ulterior e as necessidades do usuário final.

A refinação de fibras de polpas kraft afeta a dimensão da seção transversal da fibra, o comprimento da fibra e o coarseness da fibra. A refinação em baixa consistência também endireita as fibras, tornando-as, portanto, mais fortes. As propriedades físicas e a reação à refinação de polpas químicas nunca secadas e secadas diferem (Scallan e Tigerström, 1992; Laivins e Scallan, 1996; Seth, 2001). Fibras secadas e reumedecidas são rígidas, e as nunca secadas, mais flexíveis ou conformáveis. De forma correspondente, as paredes de fibras secadas e reumedecidas são rígidas. A diferença entre a reação à refinação de fibras secadas e aquela de fibras nunca secadas se deve principalmente ao efeito de histerese (Wang, 2006).

A relação entre a morfologia das fibras da polpa e as propriedades do papel foi amplamente estudada ao longo dos anos (Dadswell *et al.*, 1962; Wangaard, 1962; Dinwoodie, 1966; Wardrop, 1969; Scurfield, 1976; Amidon, 1981; Seth e Page, 1988). Ficou demonstrado que o comprimento e a resistência das fibras são particularmente importantes para a resistência ao rasgo (Seth e Page, 1988; Tamolang *et al.*, 1968; Wangaard e Williams, 1970). A espessura da parede da fibra tem uma influência importante sobre a maioria das propriedades do papel, sendo que fibras de paredes grossas formam folhas volumosas de baixa resistência à tração, mas de alta resistência ao rasgo (Dadswell *et al.*, 1962; Wardrop, 1969).

Numa tentativa de caracterizar a uniformidade e a qualidade das fibras, sugeriu-se anteriormente que, ao invés de focalizar os valores médios, é a heterogeneidade do material

INTRODUCTION

Low consistency (LC) refining has long been used to improve the tensile strength of paper, but the mechanisms of why refining produces these improvements is not yet fully understood and is therefore a topic of current research. The primary effects of refining are the creation of new surfaces, the creation of new particles and structural changes to the fibers (Hietanen and Ebeling, 1990). The major changes in fiber morphology that occur with refining have been thoroughly studied by Page (1989).

Refining is one of the most important unit operations in paper manufacturing, since it modifies the fiber properties and thus practically all the properties of the product. Some paper properties (such as tensile strength) improve as fibers are refined further, whereas some properties (such as opacity) deteriorate. For critical property pairs such as tensile strength and opacity, a compromise must be made to ensure the best possible result in view of further processing and the needs of the end user.

The refining of kraft pulp fibers affects the cross-section dimension of the fiber, fiber length and fiber coarseness. Low consistency refining also straightens the fibers therefore making them stronger. The physical properties and the response to refining of never-dried and dried chemical pulps differ (Scallan and Tigerström, 1992; Laivins and Scallan, 1996; Seth, 2001). Dried and rewetted fibers are stiff, never-dried more flexible or conformable. Correspondingly, the walls of dried and rewetted fibers are stiff. The difference between the refining response of dried and never-dried fibers is mainly due to the hysteresis effect (Wang, 2006).

*The relationship between pulp fiber morphology and paper properties has been extensively studied over the years (Dadswell *et al.*, 1962; Wangaard, 1962; Dinwoodie, 1966; Wardrop, 1969; Scurfield, 1976; Amidon, 1981; Seth and Page, 1988). Fiber length and strength have been shown to be particularly important for tearing resistance (Seth and Page, 1988; Tamolang *et al.*, 1968; Wangaard and Williams, 1970). The thickness of the fiber wall has an important bearing on most paper properties, with thick-walled fibers forming bulky sheets of low tensile but high tearing strength (Dadswell *et al.*, 1962; Wardrop, 1969).*

In an attempt to characterize the uniformity and quality of fibers, it has previously been suggested that, instead of focusing on the mean values, the heterogeneity of the fiber material should be taken into account (Kerekes, 2005; Jang and Seth, 2004).

fibroso que deveria ser levada em consideração (Kerekes, 2005; Jang e Seth, 2004). Ao basear-se unicamente nos valores médios, a natureza heterogênea da propriedade das fibras permanece obscura. As dimensões, propriedades físicas e as distribuições das propriedades variam consideravelmente entre as fibras. É uma idéia interessante investigar se a largura ou o formato da distribuição (segundo e terceiro momento central da distribuição, respectivamente) podem ser usados para prever as propriedades técnicas do papel.

Na primeira parte deste artigo, investiga-se e discute-se o efeito da refinação nas distribuições da dimensão transversal de fibras de polpas de eucalipto secadas e secadas-uma-vez. Todas as medições referidas neste estudo foram realizadas com um analisador de fibras FiberLab® (Metso Automation, 2001). Além disso, são discutidos os aspectos característicos desta técnica de medição e a maneira pela qual as distribuições da largura e da espessura da parede das fibras, obtidas com o FiberLab®, deveriam ser consideradas.

Na segunda parte deste artigo, examinamos o efeito de distribuições de propriedades dimensionais de fibras não-refinadas sobre propriedades de folhas manuais de laboratório. Estudos anteriores se concentraram nas dimensões médias das fibras, enquanto o presente estudo examina tanto o efeito do desvio padrão, quanto da assimetria dessas dimensões. Até a presente data, não se publicou nenhum estudo sistemático da relação entre distribuições da dimensão transversal das fibras e as propriedades da folha de polpas de eucalipto. As características dimensionais variam em larga medida no âmbito de uma população de fibras. O conhecimento da distribuição dimensional é importante ao serem avaliadas as propriedades globais da população, a fim de julgar se algumas fibras deveriam receber um tratamento adicional e de prever o efeito das distribuições nas propriedades do uso final.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

As quatro amostras de polpa de madeira de fibra curta, incluídas na primeira parte desta pesquisa, eram de qualidade industrial, consistindo em polpas de eucalipto (*E. grandis*/*E. saligna*, *E. nitens*/*E. globulus*, *E. urograndis* e *E. grandis*/*E. dunnii*) com diferentes históricos de secagem. *E. grandis*/*E. saligna* contém aproximadamente 50/50 de cada espécie, *E. nitens*/*E. globulus* consistem principalmente em *E. nitens*, e *E. grandis*/*E. dunnii* consistem principalmente em *E. grandis*. Todas as polpas foram refinadas mediante utilização de um refinador Voith Sulzer modelo laboratorial. O dispositivo de refinação usado consistiu de disco de lâminas, consistência de 4% e carga específica nas lâminas de 0,4 J/m, com energias de refinação de 0, 40, 80 e 120 kWh/t. Foram tomadas duas amostras de cada polpa, ambas secadas em máquina e

When relying solely on the mean values, the heterogeneous nature of the fiber property remains unclear. The dimensions, physical properties and property distributions vary considerably between fibers. It is an interesting idea to investigate whether the width or the shape of the distribution (second and third central moment of the distribution, respectively) can be used to predict the technical properties of paper.

In the first part of this paper, the effect of refining on the transverse dimension distributions of both once-dried and dried eucalyptus pulp fibers is investigated and discussed. All measurements carried out in this study were made with a FiberLab® fiber analyzer (Metso Automation, 2001). In addition, the characteristic features of this measuring technique and how eucalyptus fiber distributions of fiber width and wall thickness obtained with FiberLab® should be considered are discussed.

In the second part of this paper, we examine the effect of un-refined fiber dimension property distributions on handsheet properties. Previous studies have concentrated on mean dimensions of fibers whereas this study examines the effect of both the standard deviation and skewness of these dimensions. To date, no systematic study of the relationship between distributions of fiber transverse dimension and sheet properties of eucalyptus pulps has been published. The dimensional characteristics vary widely within a fiber population. Knowledge of the dimensional distribution is important when assessing the overall properties of the population, in order to judge if some fibers should be given further treatment, and to predict the effect of the distributions on the end use properties.

MATERIALS AND METHODS

Materials

*The four hardwood pulp samples included in the first part of this research were of industrial grade, and consisted of eucalyptus pulps (*E. grandis*/*E. saligna*, *E. nitens*/*E. globulus*, *E. urograndis* and *E. grandis*/*E. dunnii*) with different drying histories. *E. grandis*/*E. saligna* contains roughly 50/50 of each species, *E. nitens*/*E. globulus* is mostly *E. nitens*, and *E. grandis*/*E. dunnii* is mostly *E. grandis*. All pulps were refined using a laboratory model Voith Sulzer refiner. The refining tackle used was a disk blade with a stock concentration of 4% at a specific edge load of 0.4 J/m with refining energies of 0, 40, 80 and 120 kWh/t. Two samples of each pulp were taken. Both of these samples were machine dried and refined. One sample was analyzed with Fiber-*

refinadas. Uma das amostras foi analisada com o FiberLab® diretamente a partir da suspensão de polpa, sem qualquer secagem adicional. A outra amostra foi secada numa estufa de laboratório (105°C) antes da análise. Neste estudo, faz-se referência às amostras como secadas-uma-vez e secadas, respectivamente. Na segunda parte deste estudo, são usadas somente polpas secadas-uma-vez para correlacionar a espessura da parede das fibras às propriedades de folhas manuais.

Preparação das folhas manuais

As folhas manuais foram produzidas num formador de folhas de laboratório padrão, com reciclagem de água branca, de acordo com a norma SCAN C26:76.

Medições das dimensões das fibras

O equipamento de medição FiberLab® consiste de um analisador e de uma unidade amostradora. Duas câmeras com dispositivo de carga acoplada (CCD) captam imagens das fibras. Os resultados diretos são o comprimento, a largura e a espessura da parede celular da fibra. Os valores calculados são o índice de encurvamento, o coarseness, a área da seção transversal e o índice de volume (Metso Automation, 2001). Os procedimentos do processamento de fibras e imagens para obter propriedades das fibras foram descritos em detalhe em outra parte (Metso Automation, 2001).

Os resultados usados neste estudo foram calculados a partir de medições de fibras individuais. Foi desenvolvido um programa Fortran, em que as larguras e a espessura da parede das fibras estão divididas em intervalos de 0,74 µm. Foi medida uma média de 9000 fibras por amostra. O programa calcula as características das distribuições, isto é, a média, o desvio padrão e a assimetria, para comprimento, largura e espessura da parede das fibras. O programa também prediz o índice de tração, o módulo de elasticidade e o volume específico com base em medições da espessura da parede das fibras.

Confiabilidade das medições com FiberLab®

As medições com o FiberLab foram realizadas em duplicata para cada amostra de polpa. Mediante a aplicação de um teste U Mann-Whitney (Jotuni, 1967), a variação dos valores médios das duplicatas da espessura da parede das fibras foi de aproximadamente ± 0,06 micron (intervalo de confiança de 95%). Ainda que tenham sido medidas aproximadamente 9000 fibras por distribuição, isto é provavelmente uma subestimação, uma vez que a resolução das medições da espessura da parede das fibras é de 0,74 micron. Para minimizar o efeito da preparação das amostras como fonte de variação, a mesma pessoa foi responsável também pela análise das amostras. Ainda que tenha havido preocupação quanto à precisão das medições do FiberLab®, Versão 3.0,

Lab® directly from the pulp suspension without any additional drying. The other sample was dried in a laboratory oven (105°C) before analysis. In this study, the samples are referred to as once-dried and dried, respectively. In the second part of this study, only once-dried pulps are used to correlate fiber wall thickness and handsheet properties.

Handsheet preparation

Handsheets were made in a standard laboratory handsheet former with white water recycling, according to the SCAN C26:76 standard.

Measurements of fiber dimensions

The FiberLab® measurement equipment consists of an analyzer and a sample unit. Two CCD cameras capture fiber images. The direct results are the length, width and thickness of the cell wall of the fiber. The calculated values are the curl index, coarseness, cross-sectional area and volume index (Metso Automation, 2001). Procedures of fiber and image processing to obtain fiber properties have been described in detail elsewhere (Metso Automation, 2001).

The results used in this study are calculated from measurements of individual fibers. A Fortran program was developed where the fiber widths and wall thickness are divided into intervals of 0.74 µm. An average of 9000 fibers was measured in one sample. The program calculates the characteristics of the distributions, i.e. mean, standard deviation and skewness, for fiber length, width and fiber wall thickness. The program also predicts tensile index, elastic modulus and bulk on the basis of measurements of fiber wall thickness.

Reliability of the FiberLab® measurements

FiberLab measurements were made in duplicates for each pulp sample. By using a Mann-Whitney U test (Jotuni, 1967), the variation of the mean values of fiber wall thickness duplicates was approximately ± 0.06 microns (95% confidence interval). Even though roughly 9000 fibers per distribution is measured, this is probably an underestimation, since the resolution of measurements of fiber wall thickness is 0.74 microns. To minimize the effect of sample preparation as a source of variation, same person was responsible for analyzing the samples. Even though there have been concerns about the accuracy of FiberLab® Version 3.0 measurements, especially for fiber wall thickness index (Richard-

principalmente com referência ao índice de espessura da parede das fibras (Richardson, 2003), com base nos resultados obtidos neste estudo parece haver correlação entre as características da espessura da parede das fibras, medidas com o FiberLab®, e as propriedades das folhas manuais. É preciso observar que as medições foram realizadas com fibras inchadas, e a espessura da parede medida não é a espessura real da parede das fibras.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O efeito da refinação nas distribuições das propriedades das fibras

A refinação não altera a média das distribuições dos comprimentos das fibras de comprimento ponderado (Tabela 1).

Todavia, os comprimentos médios das fibras, medidos pelo

son, 2003), based on the results obtained in this study there seems to be correlation between fiber wall thickness characteristics measured with FiberLab® and handsheet properties. It should be noted that the measurement are made for swollen fibers, and the wall thickness measured is not the true wall thickness of the fibers.

RESULTS AND DISCUSSION

The effect of refining on distributions of fiber properties

Refining does not change the mean of length-weighted fiber length distributions (Table 1).

However, the average fiber lengths measured by FiberLab® should be treated with caution,

Tabela 1. Efeito de cargas energéticas sobre as dimensões médias das fibras, medido com o analisador FiberLab®
Table 1. Effect of energy load on the mean fiber dimensions with FiberLab® analyzer

POLPA PULP	ENERGIA DE REFINAÇÃO REFINING ENERGY (kWh/t)	COMPRIMENTO DA FIBRA FIBER LENGTH (mm)	LARGURA WIDTH (mm)	ESPESSURA DA PAREDE WALL THICKNESS (mm)	ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL CROSS-SECTIONAL AREA (mm ²)
<i>E. Urograndis</i> Não-secado (a) Un-dried	0	0.82	15.9	3.3	180
	40	0.82	15.7	3.4	185
	80	0.82	16.0	3.5	190
	120	0.81	16.0	3.5	187
<i>E. Grandis/E. Dunnii</i> Não-secado (a) Un-dried	0	0.81	15.9	3.4	182
	40	0.82	16.2	3.6	191
	80	0.82	16.0	3.7	192
	120	0.82	16.3	3.7	195
<i>E. Grandis/E. saligna</i> Não-secado (a) Un-dried	0	0.80	16.0	3.1	174
	40	0.81	16.4	3.4	185
	80	0.82	16.3	3.4	188
	120	0.81	16.2	3.4	187
<i>E. Nitens/E. globulus</i> Não-secado (a) Un-dried	0	0.81	16.0	3.3	189
	40	0.82	16.0	3.5	186
	80	0.81	16.4	3.6	199
	120	0.82	16.0	3.5	190
<i>E. Urograndis</i> SECADO (A) DRIED	0	0.83	15.4	3.3	178
	40	0.81	15.3	3.3	175
	80	0.81	15.2	3.2	175
	120	0.80	15.2	3.2	173
<i>E. Grandis/E. Dunnii</i> SECADO (A) DRIED	0	0.81	15.8	3.4	187
	40	0.81	15.7	3.4	187
	80	0.80	15.6	3.4	184
	120	0.80	15.5	3.3	181
<i>E. Grandis/E. saligna</i> SECADO (A) DRIED	0	0.79	15.9	3.1	178
	40	0.79	15.6	3.1	177
	80	0.78	15.4	3.1	177
	120	0.78	15.4	3.1	176
<i>E. Nitens/E. globulus</i> SECADO (A) DRIED	0	0.82	15.6	3.3	178
	40	0.82	15.6	3.3	175
	80	0.80	15.6	3.3	175
	120	0.80	15.5	3.4	173

FiberLab®, deveriam ser considerados com cautela, uma vez que constituem a média de todas as fibras medidas, o que inclui fibras longas, fragmentos de paredes celulares e finos. Mediante a utilização seja de comprimentos das fibras de comprimento ponderado, seja de peso ponderado, a influência dos finos e dos fragmentos de paredes celulares pode ser compensada. Sabe-se que o comprimento das fibras de comprimento ponderado é um bom indicador da resistência da folha (Paavilainen, 1990), porque o processo de cálculo da média reduz a influência dos finos, que não agem como elementos portadores de carga dentro da folha formada. No entanto, os resultados obtidos com distribuições de comprimentos de comprimento ponderado e de peso ponderado são muito semelhantes e, portanto, ambos podem ser utilizados. As alterações de desvio padrão e de assimetria são apresentadas na Tabela 2.

A medida de assimetria de uma distribuição é usada para caracterizar as caudas das distribuições. A assimetria é positiva para distribuições com cauda torcida para a direita, e negativa para distribuições com cauda torcida para a esquerda. A assimetria apresenta um valor de 0 para uma distribuição normal. Ela pode ser calculada da seguinte maneira (Crowley e Kyu, 1997):

since they are the average of all of the measured fibers, which include long fibers as well as cell wall fragments and fines. By using either length-weighted or weight-weighted fiber lengths, the influence of fines and cell wall fragments can be compensated. It is known that the length-weighted fiber length is a good indicator of the sheet strength (Paavilainen, 1990) because the averaging process reduces the influence of fines, which do not act as load-bearing elements within the formed sheet. However, the results obtained with length-weighted and weight-weighted length distributions are very similar and therefore both can be used. The changes in standard deviation and skewness are presented in Table 2.

Skewness is a measure of asymmetry of a distribution. It is used to characterize the tails of the distributions. Skewness is positive for distributions with tail skewed to the right, and negative for distributions with tail skewed to the left. Skewness has a value of 0 for a normal distribution. It can be calculated as follows (Crowley and Kyu, 1997):

Tabela 2. Características de distribuições discretas do comprimento das fibras e sua alteração relativa na refinação
Table 2. Characteristics of discrete fiber length distributions and their relative change in refining

Antes da refinação <i>Before refining</i>	<i>E. grandis/ E. saligna</i> não-secado(a) <i>un-dried</i>	<i>E. nitens/ E. globulus</i> não-secado(a) <i>un-dried</i>	<i>E. urograndis</i> não-secado(a) <i>un-dried</i>	<i>E. grandis/ E. dunnii</i> não-secado(a) <i>un-dried</i>	<i>E. grandis/ E. saligna</i> secado(a) <i>dried</i>	<i>E. nitens/ E. globulus</i> secado(a) <i>dried</i>	<i>E. urograndis</i> secado(a) <i>dried</i>	<i>E. grandis/ E. dunnii</i> secado(a) <i>dried</i>
Média (mm) <i>Mean (mm)</i>	0,80 <i>0.80</i>	0,81 <i>0.81</i>	0,82 <i>0.82</i>	0,81 <i>0.81</i>	0,79 <i>0.79</i>	0,82 <i>0.82</i>	0,83 <i>0.83</i>	0,81 <i>0.81</i>
Variância (mm) <i>Variance (mm)</i>	0,232 <i>0.232</i>	0,233 <i>0.233</i>	0,219 <i>0.219</i>	0,217 <i>0.217</i>	0,228 <i>0.228</i>	0,233 <i>0.233</i>	0,228 <i>0.228</i>	0,215 <i>0.215</i>
Assimetria <i>Skewness</i>	-0,121 <i>-0.121</i>	-0,127 <i>-0.127</i>	-0,178 <i>-0.178</i>	-0,162 <i>-0.162</i>	-0,117 <i>-0.117</i>	-0,127 <i>-0.127</i>	-0,124 <i>-0.124</i>	-0,176 <i>-0.176</i>
Após refinação / After refining								
Média (mm) <i>Mean (mm)</i>	0,81 <i>0.81</i>	0,82 <i>0.82</i>	0,81 <i>0.81</i>	0,82 <i>0.82</i>	0,78 <i>0.78</i>	0,80 <i>0.80</i>	0,80 <i>0.80</i>	0,80 <i>0.80</i>
Variância (mm) <i>Variance (mm)</i>	0,239 <i>0.239</i>	0,237 <i>0.237</i>	0,226 <i>0.226</i>	0,223 <i>0.223</i>	0,227 <i>0.227</i>	0,228 <i>0.228</i>	0,236 <i>0.236</i>	0,221 <i>0.221</i>
Assimetria <i>Skewness</i>	-0,104 <i>-0.104</i>	-0,112 <i>-0.112</i>	-0,131 <i>-0.131</i>	-0,155 <i>-0.155</i>	-0,109 <i>-0.109</i>	-0,128 <i>-0.128</i>	-0,117 <i>-0.117</i>	-0,152 <i>-0.152</i>
Δ média (%) <i>Δ mean (%)</i>	0,40 <i>0.40</i>	0,29 <i>0.29</i>	-0,61 <i>-0.61</i>	0,44 <i>0.44</i>	-2,20 <i>-2.20</i>	-3,39 <i>-3.39</i>	-3,07 <i>-3.07</i>	-0,91 <i>-0.91</i>
Δ variância (%) <i>Δ variance (%)</i>	3,11 <i>3.11</i>	1,71 <i>1.71</i>	3,12 <i>3.12</i>	2,50 <i>2.50</i>	-0,31 <i>-0.31</i>	-2,46 <i>-2.46</i>	3,41 <i>3.41</i>	2,86 <i>2.86</i>
Δ assimetria (%) <i>Δ skewness (%)</i>	13,95 <i>13.95</i>	11,79 <i>11.79</i>	26,52 <i>26.52</i>	3,76 <i>3.76</i>	6,63 <i>6.63</i>	-0,67 <i>-0.67</i>	5,84 <i>5.84</i>	13,70 <i>13.70</i>

$$(1) \quad \xi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^3$$

Os formatos das curvas de distribuição correspondem à função de distribuição de Weibull de três parâmetros (Milton e Arnold, 1995). O uso da distribuição de Weibull para descrever formatos característicos de distribuição de diferentes polpas foi discutido anteriormente (Pulkkinen *et al.*, 2006). Verificou-se que a distribuição de Weibull é muito flexível em termos de formato, podendo ser usada para caracterizar praticamente todas as distribuições de propriedades importantes. Num estudo anterior (Pulkkinen *et al.*, 2006), o método do momento (Randolph e Larson, 1988) foi usado para encontrar os parâmetros das distribuições a partir dos dados medidos. No presente estudo, foram usadas distribuições discretas.

O aumento da variância e da assimetria da distribuição dos comprimentos de fibras secadas-uma-vez pode ser atribuído ao endireitamento das fibras e à formação de finos secundários durante a refinação. O aumento da quantidade de frações de tamanho médio resulta em valores médios inalterados, calculados como comprimento das fibras de comprimento ponderado. As caudas das distribuições dos comprimentos das fibras estão mais torcidas para a esquerda e, portanto, os valores de assimetria são negativos. A refinação de fibras secadas não teve qualquer efeito específico sobre as distribuições.

A largura de fibras de eucalipto secadas-uma-vez aumentou ou permaneceu inalterada quando se aplicou energia de refinação. A reação à refinação para fibras secadas e reumedecidas se desviou marcadamente daquela de fibras secadas-uma-vez, sendo que a largura das fibras geralmente sofreu aumento, mais do que redução.

A largura média de polpas de eucalipto secadas-uma-vez sofreu um ligeiro aumento (Tabela 3). Conforme indicado na Tabela 3, as alterações do desvio padrão e, principalmente, da assimetria, eram perceptíveis, mas não seguem nenhuma tendência específica.

A largura média da fibra secada se reduziu e a distribuição correspondente ficou mais homogênea. Os resultados do processo de refinação se vêem mais claramente ao ser considerada a distribuição como um todo. As alterações relativas nos valores médios da largura das fibras foram secundárias, mas as mudanças no desvio padrão e na assimetria foram mais evidentes (Tabela 3).

A média da espessura da parede das amostras de fibras de eucalipto secadas-uma-vez aumentou ao ser aplicada energia de refinação, tornando-se a distribuição da espessura da parede mais heterogênea (Figura 2) quando a parede da fibra incha. No que se refere às alterações relativas das características das fibras, tanto os valores médios, quanto os desvios padrão, se alteraram moderadamente (Tabela 4).

$$(1) \quad \xi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^3$$

The shapes of the distribution curves fit the three-parameter Weibull distribution function (Milton and Arnold, 1995). The use of the Weibull distribution to describe characteristic distribution shapes of different pulps has been discussed previously (Pulkkinen et al., 2006). The Weibull distribution was found to be very flexible in shape, and can be used to characterize practically all important property distributions. In a previous study (Pulkkinen et al., 2006), the method of moment (Randolph and Larson, 1988) was used to find the parameters of the distributions from the measured data. In this study, discrete distributions were used.

The increase in variance and skewness of the fiber length distribution of once-dried fibers can be attributed to the straightening of the fibers and to the formation of secondary fines during refining. The increased amount of mid-sized fractions results in unchanged mean values calculated as length-weighted fiber length. The tails of the fiber length distributions are more skewed to the left, therefore the skewness values are negative. The refining of dried fibers had no particular effect on the distributions.

The width of once-dried eucalyptus fibers either increased or remained unchanged when refining energy was applied. The response to refining for dried and rewetted fibers deviated markedly from that of once-dried fibers, where fiber width generally increased rather than decreased.

The mean width of once-dried eucalyptus pulps was slightly increased (Table 3). As depicted in Table 3, the changes in standard deviation and especially in skewness were noticeable but do not follow any particular trend.

The mean width of the dried fiber decreases and the corresponding distribution became more homogeneous. The results of the refining process are seen more clearly when considering the whole distribution. The relative changes in the mean values of the fiber width were minor, but changes in standard deviation and skewness were more distinctive (Table 3).

The mean of the fiber wall thickness of the once-dried eucalyptus fiber samples increased as refining energy was applied and the distribution of wall thickness becomes more heterogeneous (Figure 2) when the fiber wall swells. As far as the relative changes in fiber characteristics are concerned, both the mean values and the standard deviations changed moderately (Table 4).

Tabela 3. Características das distribuições discretas da largura das fibras e sua alteração relativa na refinação
Table 3. Characteristics of discrete fiber width distributions and their relative change in refining

Antes da refinação <i>Before refining</i>	<i>E. grandis/</i> <i>E. saligna</i> não-secado(a) <i>un-dried</i>	<i>E. nitens/</i> <i>E. globulus</i> não-secado(a) <i>un-dried</i>	<i>E. urograndis</i> não-secado(a) <i>un-dried</i>	<i>E. grandis/</i> <i>E. dunnii</i> não-secado(a) <i>un-dried</i>	<i>E. grandis/</i> <i>E. saligna</i> secado(a) <i>dried</i>	<i>E. nitens/</i> <i>E. globulus</i> secado(a) <i>dried</i>	<i>E. urograndis</i> secado(a) <i>dried</i>	<i>E. grandis/</i> <i>E. dunnii</i> secado(a) <i>dried</i>
Média (µm) <i>Mean (µm)</i>	16,0 <i>16.0</i>	16,0 <i>16.0</i>	15,9 <i>15.9</i>	15,9 <i>15.9</i>	15,9 <i>15.9</i>	15,6 <i>15.6</i>	15,4 <i>15.4</i>	15,8 <i>15.8</i>
Variância (µm) <i>Variance (µm)</i>	6,07 <i>6.07</i>	7,34 <i>7.34</i>	7,66 <i>7.66</i>	5,67 <i>5.67</i>	7,40 <i>7.40</i>	7,27 <i>7.27</i>	6,36 <i>6.36</i>	6,46 <i>6.46</i>
Assimetria <i>Skewness</i>	8,73 <i>8.73</i>	14,58 <i>14.58</i>	9,45 <i>9.45</i>	13,19 <i>13.19</i>	10,75 <i>10.75</i>	16,58 <i>16.58</i>	8,85 <i>8.85</i>	9,40 <i>9.40</i>
Após refinação <i>After refining</i>								
Média (µm) <i>Mean (µm)</i>	16,2 <i>16.2</i>	16,0 <i>16.0</i>	16,0 <i>16.0</i>	16,3 <i>16.3</i>	15,4 <i>15.4</i>	15,5 <i>15.5</i>	15,2 <i>15.2</i>	15,5 <i>15.5</i>
Variância (µm) <i>Variance (µm)</i>	5,93 <i>5.93</i>	5,77 <i>5.77</i>	8,21 <i>8.21</i>	6,15 <i>6.15</i>	5,80 <i>5.80</i>	6,88 <i>6.88</i>	6,12 <i>6.12</i>	6,70 <i>6.70</i>
Assimetria <i>Skewness</i>	9,03 <i>9.03</i>	9,02 <i>9.02</i>	13,80 <i>13.80</i>	11,98 <i>11.98</i>	11,99 <i>11.99</i>	10,12 <i>10.12</i>	9,04 <i>9.04</i>	3,14 <i>3.14</i>
Δ média (%) <i>Δ mean (%)</i>	1,41 <i>1.41</i>	-0,40 <i>-0.40</i>	0,46 <i>0.46</i>	2,39 <i>2.39</i>	-3,78 <i>-3.78</i>	-0,47 <i>-0.47</i>	-1,64 <i>-1.64</i>	-2,12 <i>-2.12</i>
Δ variância (%) <i>Δ variance (%)</i>	-2,44 <i>-2.44</i>	-27,19 <i>-27.19</i>	6,63 <i>6.63</i>	7,88 <i>7.88</i>	-27,70 <i>-27.70</i>	-5,60 <i>-5.60</i>	-3,82 <i>-3.82</i>	3,50 <i>3.50</i>
Δ assimetria (%) <i>Δ skewness (%)</i>	3,35 <i>3.35</i>	-61,65 <i>-61.65</i>	31,55 <i>31.55</i>	-10,06 <i>-10.06</i>	10,36 <i>10.36</i>	-63,83 <i>-63.83</i>	2,06 <i>2.06</i>	-199,75 <i>-199.75</i>

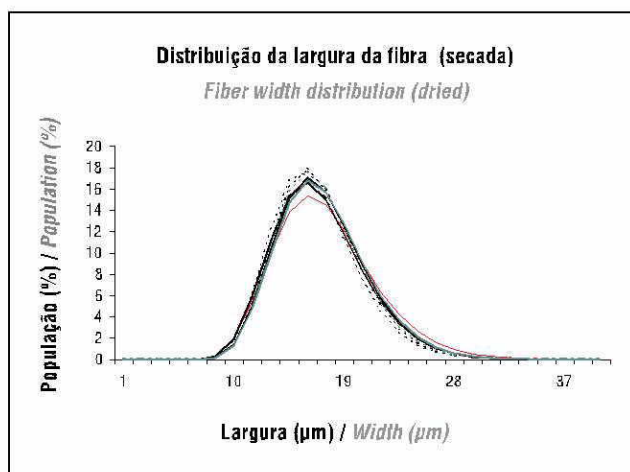
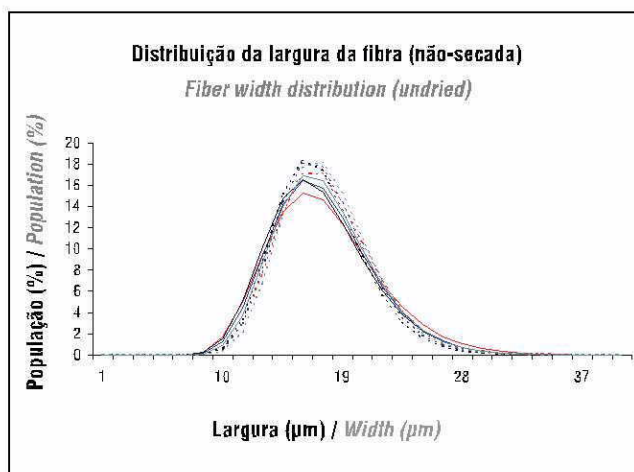


Figura 1. Distribuição da largura das fibras para fibras de eucalipto secadas-uma-vez e secadas (fibras refinadas representadas por linhas pontilhadas)

Figure 1. Fiber width distributions for once-dried and dried eucalyptus fibers (refined fibers shown by dotted lines)

No entanto, não havia qualquer padrão inequívoco que indicasse como as distribuições das paredes das fibras se comportavam. O desvio padrão de fibras secadas-uma-vez da espécie *E. urograndis* sofreu uma redução significativa.

However, there was no clear pattern of how fiber wall distributions behave. The standard deviation of once-dried fibers of *E. urograndis* was reduced significantly. The decrease in skewness was high for

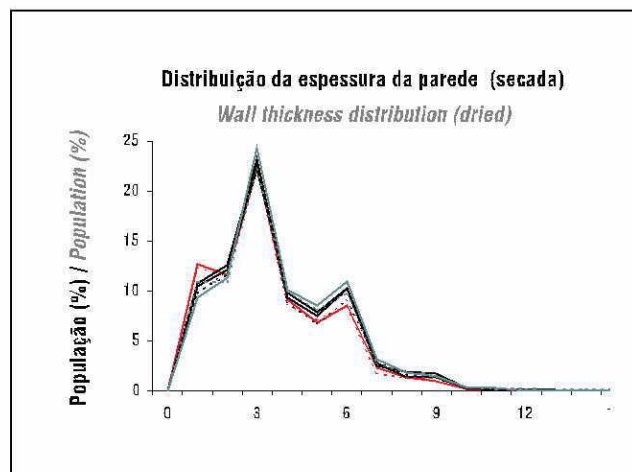
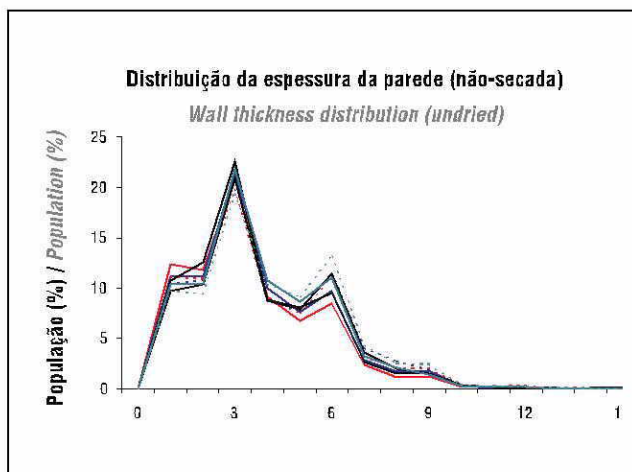


Figura 2. Distribuições da espessura da parede das fibras, para fibras de eucalipto secadas uma vez e secadas (fibras refinadas representadas por linhas pontilhadas)

Figure 2. Fiber wall thickness distributions for once-dried and dried eucalyptus fibers (refined fibers shown by dotted lines)

Tabela 4. Características de distribuições discretas da espessura da parede da fibra e sua alteração relativa na refinação

Table 4. Characteristics of discrete fiber wall thickness distributions and their relative change in refining

Antes da refinação <i>Before refining</i>	<i>E. grandis/</i> <i>E. saligna</i> não-secado(a) <i>un-dried</i>	<i>E. nitens/</i> <i>E. globulus</i> não-secado(a) <i>un-dried</i>	<i>E. urograndis</i> não-secado(a) <i>un-dried</i>	<i>E. grandis/</i> <i>E. dunnii</i> não-secado(a) <i>un-dried</i>	<i>E. grandis/</i> <i>E. saligna</i> secado(a) <i>dried</i>	<i>E. nitens/</i> <i>E. globulus</i> secado(a) <i>dried</i>	<i>E. urograndis</i> secado(a) <i>dried</i>	<i>E. grandis/</i> <i>E. dunnii</i> secado(a) <i>dried</i>
Média (μm) <i>Mean (μm)</i>	16,0 3.1	16,0 3.3	15,9 3.3	15,9 3.4	15,9 3.1	15,6 3.3	15,4 3.3	15,8 3.4
Variância (μm) <i>Variance (μm)</i>	6,07 2.15	7,34 2.22	7,66 2.35	5,67 2.07	7,40 2.43	7,27 2.26	6,36 2.42	6,46 2.30
Assimetria <i>Skewness</i>	8,73 2.38	14,58 2.16	9,45 4.17	13,19 1.14	10,75 4.92	16,58 4.65	8,85 6.44	9,40 3.27
Após refinação / After refining								
Média (μm) <i>Mean (μm)</i>	16,2 3.4	16,0 3.5	16,0 3.5	16,3 3.7	15,4 3.1	15,5 3.4	15,2 3.2	15,5 3.3
Variância (μm) <i>Variance (μm)</i>	5,93 2.23	5,77 2.25	8,21 2.16	6,15 2.14	5,80 1.96	6,88 2.22	6,12 2.08	6,70 2.42
Assimetria <i>Skewness</i>	9,03 1.73	9,02 1.67	13,80 1.26	11,98 0.61	11,99 1.44	10,12 2.52	9,04 1.99	3,14 2.32
Δ média (%) Δ mean (%)	1,41 8.68	-0,40 4.97	0,46 5.38	2,39 7.35	-3,78 -1.03	-0,47 1.83	-1,64 -2.41	-2,12 -3.02
Δ variância (%) Δ variance (%)	-2,44 3.74	-27,19 1.40	6,63 -8.86	7,88 2.98	-27,70 -23.87	-5,60 -1.56	-3,82 -16.32	3,50 4.79
Δ assimetria (%) Δ skewness (%)	3,35 -37.52	-61,65 -29.22	31,55 -230.14	-10,06 -85.59	10,36 -241.71	-63,83 -84.77	2,06 -224.07	-199,75 -40.94

A redução da assimetria foi alta no caso de fibras secadas-uma-vez. Isto provavelmente se deve ao destacamento de fragmentos da parede das fibras, para criar novas partículas. Não é possível ver isto em distribuições dos comprimentos

once-dried fibers. This is probably due to the detachment of fragments from the fiber wall to create new particles. This cannot be seen in length-weighted fiber length distributions, since in length-weighted

das fibras de comprimento ponderado, uma vez que na distribuição de comprimento ponderado a influência de finos e fragmentos de células é compensada. Todos os resultados apresentados nas Tabelas 1-4 são os valores médios de medições em duplicata de amostras analisadas. A variabilidade das medições do valor médio da espessura da parede das fibras, calculada pelo teste U Mann-Whitney (intervalo de confiança de 95%), foi de aproximadamente $\pm 0,06$ micron. A média da espessura da parede das fibras de eucalipto secadas permaneceu praticamente a mesma. Já as distribuições da espessura da parede celular foram afetadas significativamente. Parece que fibras secadas são mais rígidas do que fibras secadas-uma-vez (Seth, 2001).

A redução relativa dos valores de assimetria variou entre 30% e 250%. Parece que fibras secadas sofrem delaminação mais facilmente do que fibras secadas-uma-vez. O aumento da inchação das fibras pôde explicar a média inalterada da espessura da parede das fibras. Quando se comparam os parâmetros de duas populações de fibras, usualmente são examinadas as médias das populações, ignorando-se com frequência outras características. Quando se aumenta o tamanho da amostra, a confiabilidade da medição também aumenta, e o desvio padrão se aproxima de um valor finito. O analisador FiberLab® mede o comprimento, a largura e a espessura da parede das fibras para até 9000 fibras. As quantidades calculadas são a área da seção transversal, o índice de volume e o encurvamento das fibras. O FiberLab® também fornece um valor médio para o coarseness. O número de fibras necessário para atingir um valor limitativo para o desvio padrão foi testado com um simples programa Matlab, tendo-se verificado que cerca de 4000 fibras eram o suficiente para obter resultados confiáveis (Figura 3). Resultados semelhantes foram obtidos para outras propriedades (comprimento e largura das fibras) e características (média e assimetria).

Propriedades da folha em relação a propriedades da fibra

A morfologia da fibra e as propriedades do papel, obtidas em testes a partir de papel feito em laboratório ou na máquina de papel, são os dois conjuntos de informações de que se necessita para prever a adequabilidade de uma polpa para a fabricação de certas qualidades de

distribution the influence of fines and cell fragments is compensated. All results presented in Tables 1-4 are the mean values of duplicate measurements of samples analyzed. The variability of fiber wall thickness mean value measurements calculated with Mann-Whitney U test (confidence interval of 95%) was approximately ± 0.06 microns. The mean of the fiber wall thickness of the dried eucalyptus fibers remained practically the same. In contrast, the distributions of cell wall thickness were affected significantly. It seems that dried fibers are more rigid than once-dried fibers (Seth, 2001).

The relative decrease in skewness values varied between 30%-250%. It seems that dried fibers delaminate more easily than once-dried fibers. The increase in swelling of the fibers could explain the unchanged mean of fiber wall thickness. When the parameters of two fiber populations are compared, usually the population means are examined and other characteristics are often ignored. When the sample size is increased, the reliability of the measurement is improved and the standard deviation will approach a finite value. The FiberLab® analyzer measures fiber length, width and wall thickness for up to 9000 fibers. Calculated quantities are cross-sectional area, volume index and fiber curl. FiberLab® also provides an average value for coarseness. The number of fibers required to reach a limiting value for standard deviation was tested with a simple Matlab program, and it appeared that about 4000 fibers were enough to obtain reliable results (Figure 3). Similar results were obtained for other properties (length and width of fiber) and characteristics (mean and skewness).

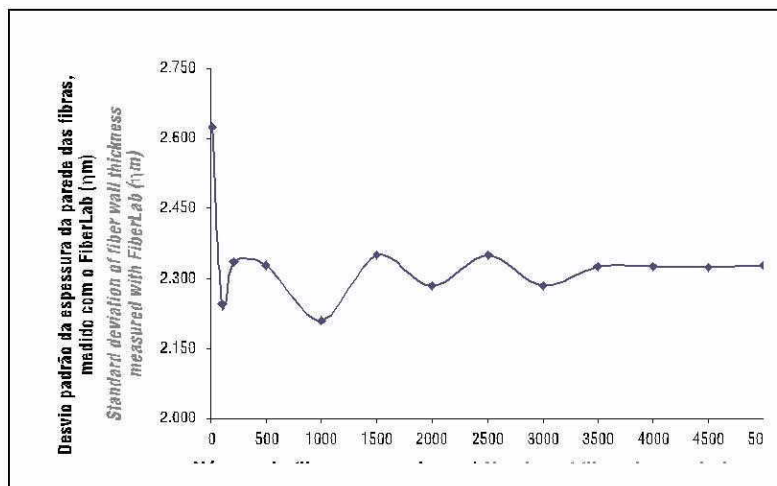


Figura 3. Desvio padrão da espessura da parede das fibras em função do número de fibras numa população antes da refinação
Figure 3. Standard deviation of fiber wall thickness as a function of the number of fibers in a population before refining

Sheet properties in relation to fiber properties

Fiber morphology and paper properties tested from lab or machine made paper are the two sets of information required to predict the suitability of a pulp for making certain paper grades. The maximization of the potential of

papel. A maximização do potencial da matéria-prima da fibra pode ser feita, por exemplo, mediante refinação, enquanto o potencial de fracionamento e possível pós-tratamento de diferentes frações só foi explorado em escala limitada. Há modelos que utilizam distribuições dos comprimentos das fibras de eucalipto para prever as suas propriedades da folha (Johnston *et al.*, 2003; Kärenlampi, 1995), mas não foi encontrado qualquer estudo sistemático quanto ao efeito das distribuições das espessuras das paredes das fibras nas propriedades da folha.

O efeito das distribuições das espessuras da parede de polpa secada-uma-vez e não-refinada é discutido como um indicador para volume específico, índice de tração e módulo de elasticidade. O volume específico é uma propriedade muito importante tanto para as propriedades mecânicas, quanto para a imprimibilidade de várias qualidades de papel, especialmente qualidades de papel de baixa gramatura, que requerem uma boa rigidez à flexão. O volume específico é uma função do grau de colapso e da capacidade de conformação das fibras durante a formação da folha. Desta forma, fibras de pequeno diâmetro e paredes celulares grossas tendem a ser mais rígidas, formando folhas volumosas fracas. Por exemplo, a espessura média da parede das fibras de polpa kraft de eucalipto secada-uma-vez não apresenta correlação com o volume específico ou o índice de tração (Figura 4). Os valores médios da espessura das paredes das fibras, calculados pelo teste U (intervalo de confiança de 95%), estão indicados para cada ponto de medição. A Figura 5 apresenta o volume específico em função do desvio padrão e da assimetria para as mesmas distribuições. Tanto o desvio padrão, como a assimetria, apresentam uma boa correlação com o volume específico. Parece que as distribuições mais amplas produzem as folhas mais volumosas. O aumento do volume específico pode ser atribuído ao coarseness elevado das

*the fiber raw material can be done, for example, by refining, whereas the potential of fractionating and possible after-treatment of different fractions has only been exploited to a limited extent. There are models that use eucalyptus fiber length distributions to predict their sheet properties (Johnston *et al.*, 2003; Kärenlampi, 1995), but no systematic study was found about the effect of fiber wall thickness distributions on sheet properties.*

The effect of wall thickness distributions of once-dried and un-refined pulp is discussed as an indicator for bulk, tensile index and elastic modulus. Bulk is a very important property for both the mechanical properties and printability of various paper grades, particularly lightweight paper grades that require good bending stiffness. Bulk is a function of the extent of collapse and conformability of the fibers during sheet formation. Thus, fibers with small diameter and thick cell walls tend to be more rigid and form weak bulky sheets. For example, the average fiber wall thickness of once-dried eucalyptus kraft pulp shows no correlation with bulk or tensile index (Figure 4). Calculated U test values for fiber wall thickness mean values (95% confidence interval) are indicated for each measurement point. Figure 5 presents bulk as a function of the standard deviation and skewness for the same distributions. Both standard deviation and skewness have a good correlation with bulk. It seems that the widest distributions yield the bulkiest sheets. The increased bulk can be attributed to the high coarseness of the thick-walled fractions of the

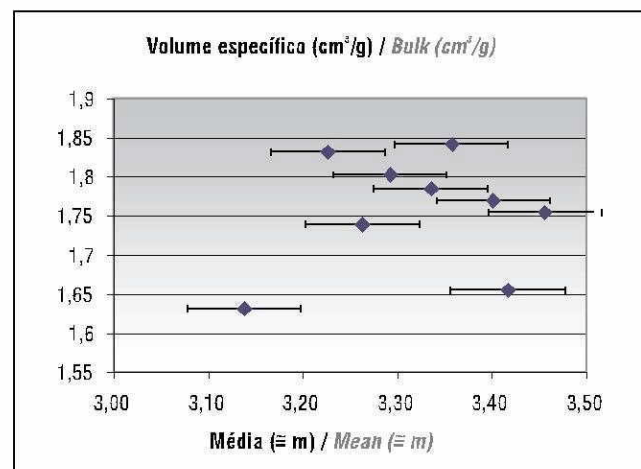
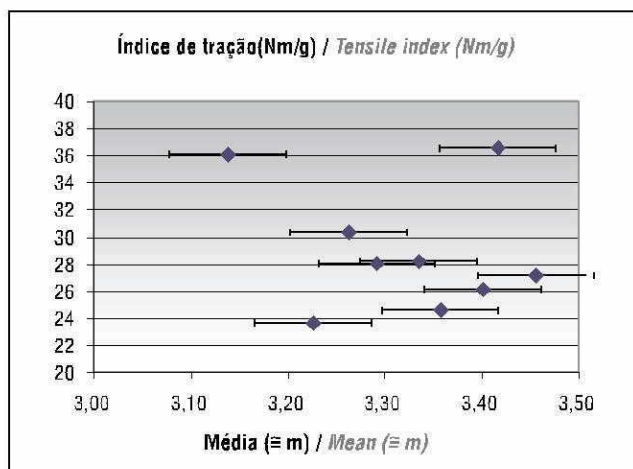


Figura 4. Índice de tração e volume específico de folhas feitas à mão, em função do valor médio da espessura da parede das fibras (barras de erro para intervalo de confiança de 95%)

Figure 4. Tensile index and bulk of handsheets as a function of mean value of fiber wall thickness (error bars for 95% confidence interval)

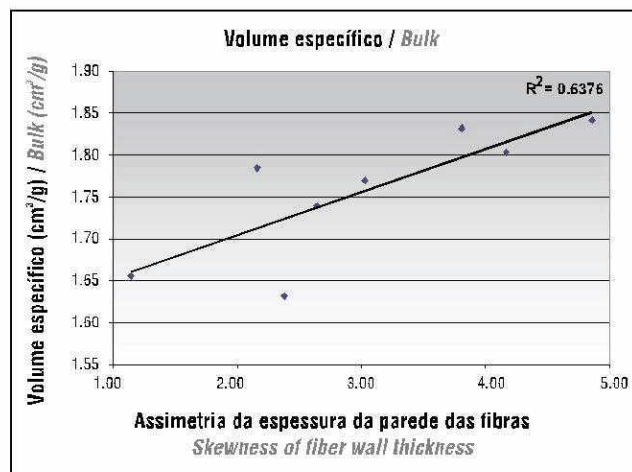
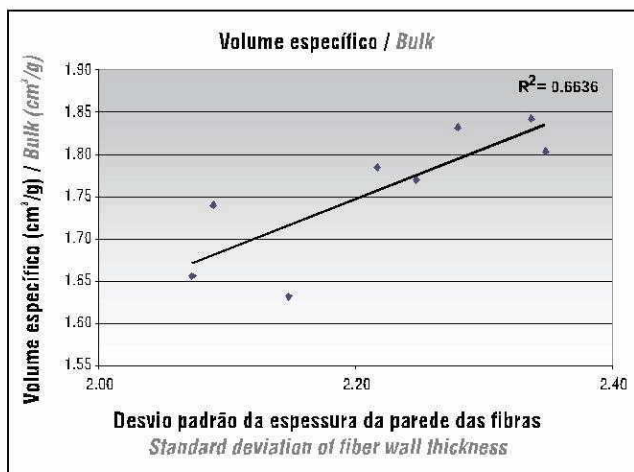


Figura 5. Volume específico em função do desvio padrão e da assimetria da espessura da parede das fibras, para polpa não-refinada
Figure 5. Bulk as a function of standard deviation and skewness of fiber wall thickness for unrefined pulp

frações de paredes grossas das polpas e à menor possibilidade de colapso destas frações depois de a folha ter sido formada e secada. Uma investigação adicional é necessária para confirmar as averiguações aqui apresentadas.

As propriedades de tração em sentido longitudinal à máquina (MD), ao invés do rasgo em sentido transversal (CD), são consideradas como sendo os fatores principais que controlam as quebras do papel na sala de impressão (Uesaka *et al.*, 2001). Conforme mencionado anteriormente, o comprimento da fibra de comprimento ponderado é um bom indicador da resistência da folha, porque o processo de determinação da média reduz a influência de finos, que não agem como elementos portadores de carga dentro da folha formada. Distribuições da espessura da parede, contudo, também podem ser usadas para prever a resistência da folha. Diagramas do índice de tração e do módulo de elasticidade em relação ao desvio padrão e à assimetria de polpa de eucalipto (Figuras 6 e 7) indicam uma clara correlação negativa destas propriedades e suas características de distribuição. O índice de rigidez à tração também apresenta uma correlação negativa em função do desvio padrão e da assimetria.

Parece que distribuições estreitas da espessura das paredes das fibras têm a resistência à tração e o módulo de elasticidade mais altos. Isto pode ser um resultado da estrutura homogênea das folhas formadas, já que fibras com as distribuições mais estreitas e mais simétricas da espessura da parede produzem as folhas mais fortes. Embora a rigidez à flexão (S_b) não tenha sido calculada neste estudo, pode-se estimá-la a partir do módulo de elasticidade (E) e da espessura da folha (h) de acordo com a equação:

$$(2) \quad S_b = \frac{E * h^3}{12}$$

pulps and the lower collapsibility of these fractions after the sheet is formed and dried. Further investigation is required in order to confirm the findings presented here.

*The machine direction (MD) tensile properties instead of cross direction (CD) tear are considered to be the main factors controlling paper breaks in the pressroom (Uesaka *et al.*, 2001). As previously stated, the length-weighted fiber length is a good indicator of sheet strength because the averaging process reduces the influence of fines, which do not act as load-bearing elements within the formed sheet. Wall thickness distributions, however, can also be used to predict sheet strength. Plots of tensile index and elastic modulus versus the standard deviation and skewness of eucalyptus pulp (Figures 6 and 7) show a clear negative correlation of these properties and their distribution characteristics. The tensile stiffness index also has a negative correlation as a function of standard deviation and skewness.*

It seems that narrow fiber wall thickness distributions have the highest tensile strength and elastic modulus. This may be a result of the homogeneous structure of formed sheets, since fibers with the narrowest and most symmetrical wall thickness distributions yield the strongest sheets. Although the bending stiffness (S_b) was not calculated in this study, it can be estimated from the elastic modulus (E) and sheet thickness (h) according to the equation:

$$(2) \quad S_b = \frac{E * h^3}{12}$$

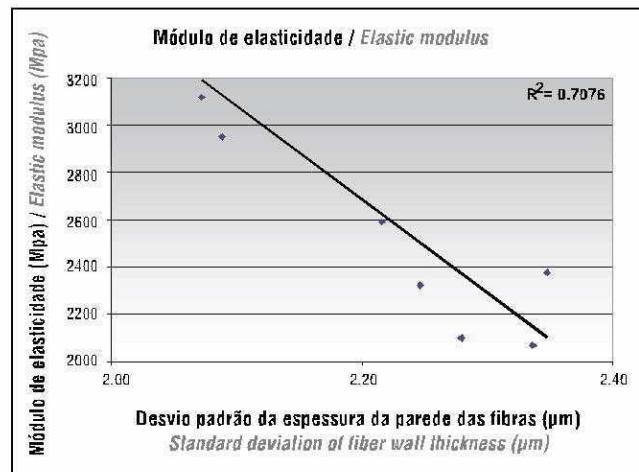
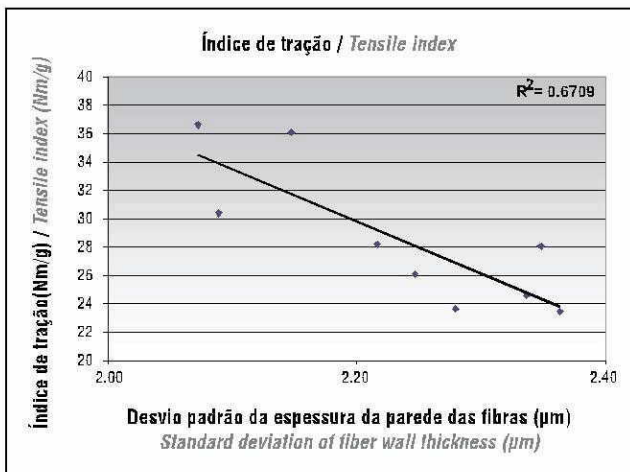


Figura 6. Índice de tração e módulo de elasticidade em função do desvio padrão da espessura da parede das fibras, para polpa não-refinada

Figure 6. Tensile index and elastic modulus as a function of standard deviation of fiber wall thickness for unrefined pulp

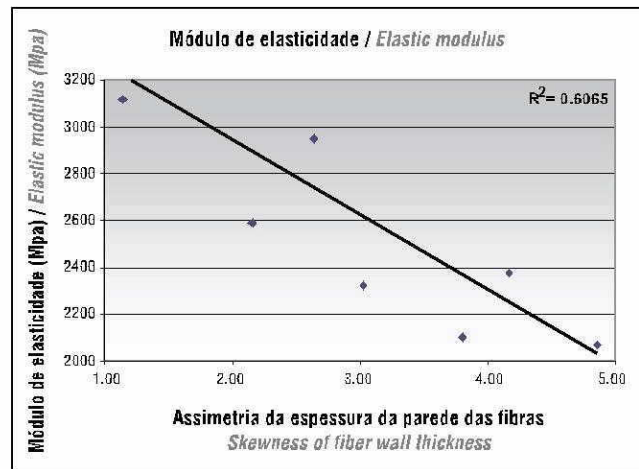
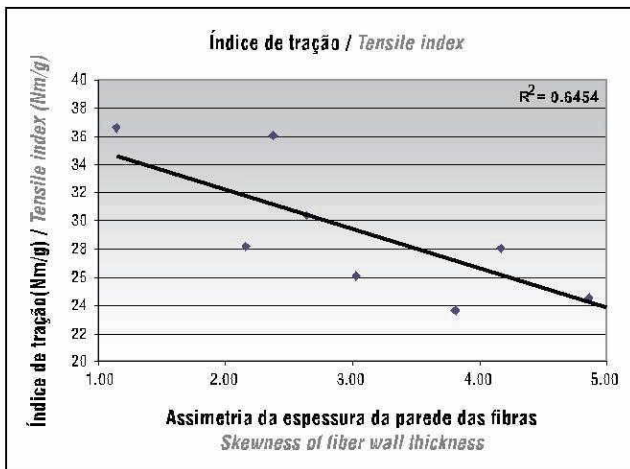


Figura 7. Índice de tração e módulo de elasticidade em função da assimetria da espessura da parede das fibras, para polpa não-refinada

Figure 7. Tensile index and elastic modulus as a function of skewness of fiber wall thickness for unrefined pulp

Por conseguinte, tanto o módulo de elasticidade, quanto o volume específico das folhas, têm efeito sobre a rigidez à flexão. A Tabela 5 indica as correlações (valores R^2) entre as distribuições da espessura das paredes das fibras e as propriedades técnicas do papel de folhas manuais.

CONCLUSÃO

A reação à refinação de fibras secadas e reumedecidas diferiu marcadamente daquela de fibras secadas-uma-vez. A espessura média das paredes das fibras das amostras de fibras de eucalipto secadas-uma-vez aumentou ao ser aplicada energia de refinação, e a distribuição da espessura da parede tornou-se mais heterogênea. A alteração dos valores médios e do desvio padrão foi

Therefore, both the elastic modulus and bulk of the sheets have an effect on bending stiffness. Table 5 shows the correlations (R^2 values) between fiber wall thickness distributions and the paper technical properties of handsheets.

CONCLUSION

The response to refining of dried and rewetted fibers deviated markedly from that of once-dried fibers. The mean fiber wall thickness of the once-dried eucalyptus fiber samples increased as refining energy was applied and the distribution of wall thickness became more heterogeneous. The change in the mean values and in standard deviation was moderate. The effects

Tabela 5. Correlações (Valores R²) entre momentos de espessura da parede das fibras e propriedades técnicas do papel

Table 5. Correlations (R² values) between fiber wall thickness moments and technical properties of paper

		Índice de tração <i>Tensile index</i> (Nm/g)	Índice de rigidez à tração <i>Tensile stiffness index</i> (kNm/g)	Volume específico <i>Bulk</i> (cm ³ /g)	Módulo de elasticidade <i>Elastic modulus</i> (Mpa)
Espessura da parede das fibras <i>Fiber wall thickness</i>	desvio padrão (µm) <i>standard deviation</i> (µm)	0,67 <i>0.67</i>	0,60 <i>0.60</i>	0,66 <i>0.66</i>	0,71 <i>0.71</i>
	assimetria <i>skewness</i>	0,65 <i>0.65</i>	0,59 <i>0.59</i>	0,64 <i>0.64</i>	0,61 <i>0.61</i>

moderada. Os efeitos do processo de refinação foram vistos mais claramente em termos da distribuição total. A assimetria se reduziu significativamente. No caso das amostras de fibras de eucalipto secadas, a espessura média da parede das fibras permaneceu a mesma ou só diminuiu ligeiramente. As distribuições da espessura da parede celular ainda foram afetadas significativamente. Os resultados aqui obtidos indicam claramente que a morfologia da fibra de polpas de eucalipto afeta as propriedades físicas das folhas. A resistência à tração era alta no caso de polpas com distribuições estreitas da espessura da parede das fibras (baixo desvio padrão e assimetria). Se um ou dois pontos de medição muito divergentes eram excluídos, os valores médios também tinham uma correlação moderada com estas propriedades. A importância dos valores médios em comparação com os de desvio padrão e assimetria ainda tem de ser descoberta. O volume específico apresentou uma correlação positiva com o desvio padrão e a assimetria da espessura da parede das fibras. Isto favorece distribuições mais largas, que podem resultar do elevado coarseness das frações de parede grossa nas polpas e da menor possibilidade de colapso dessas frações depois de a folha ter sido formada e secada. Mais uma vez, se o ponto de medição divergente era removido, a correlação do volume específico com os valores médios da espessura da parede era positiva. É preciso observar que as correlações de fibras secadas e as suas características de distribuição seguiram o mesmo padrão que fibras-secadas-uma vez. Quanto a fibras refinadas, o significado das características de distribuição das fibras foi um tanto distorcido, se compararmos dados brutos de fibras refinadas e as respectivas propriedades das folhas manuais. ▲

of the refining process were seen more clearly in terms of the total distribution. The skewness was reduced significantly. For the dried eucalyptus fiber samples, the mean fiber wall thickness remained the same or decreased only slightly. The cell wall thickness distributions were still significantly affected. The results obtained here clearly indicate that the fiber morphology of eucalyptus pulps affects the physical properties of sheets. Tensile strength was high for pulps with narrow fiber wall thickness distributions (low standard deviation and skewness). If one or two very divergent measuring points were excluded, the mean values also had moderate correlation with these properties. The significance of mean values compared to those of standard deviation and skewness is yet to be discovered. Bulk had positive correlation with standard deviation and skewness of the fiber wall thickness. This favours wider distributions, which may result from the high coarseness of the thick-walled fractions in the pulps and the lower collapsibility of these fractions after the sheet was formed and dried. Again, if the deviant measuring point was removed, the correlation of bulk with the wall thickness mean values was positive. It should be noted that the correlations of dried fibers and their distribution characteristics followed the same pattern as once-dried fibers. As for refined fibers, the meaning of fiber distribution characteristics was somehow distorted if we compare raw data of refined fibers and their handsheet properties. ▲

REFERÊNCIAS / REFERENCES

1. Hietanen, S.; Ebeling, K. (1990): *Fundamental aspects of the refining process*. Paperi ja Puu. 72(2) 158-163
2. Page, D.H. (1989): *The beating of chemical pulps- The action and the effects*. Transactions of the ninth fundamental research symposium, Cambridge, UK, 1-37
3. Scallan, A.M.; Tigerström, A.C. (1992): *Swelling and elasticity of the cell walls of pulp fibers*. J. Pulp Paper Sci. 18(5) 188-193
4. Laivins, G.V.; Scallan, A.M. (1996): *The influence of drying and beating on the swelling of fines*. J. Pulp Paper Sci. 22(5) 178-182
5. Seth, R.S. (2001): *The difference between never-dried and dried chemical pulps*. TAPPI Pulping Conference, Seattle, WA, United States, Nov. 4- 7, 296-311
6. Wang, Xinshu (2006): *Improving the papermaking properties of kraft pulp by controlling hornification and internal fibrillation*. Helsinki: Helsinki University of Technology, Doctoral Thesis
7. Dadswell, H.E.; Watson, A.J. (1962): *Influence of the morphology of woodpulp fibres on paper properties*. Transactions of the Formation and Structure of Paper Symposium. Tech. Sect. B.P.B.M.A, 537-572
8. Wangaard, F.F. (1962): *Contributions of hardwood fibers to the properties of kraft pulps*. Tappi J. 45(7) 548-555
9. Dinwoodie, J.M. (1966): *The relationship between fiber morphology and paper properties*. A review of literature. Tappi J. 48(8) 440-444
10. Wardrop, A.B. (1969): *Fiber morphology and papermaking*. Tappi J. 52(3) 396-404
11. Scurfield, G. (1976): *Structural features of hardwood and their influence on paper properties*. Tappi J. 59(7) 110-114
12. Amidon, T.H. (1981): *Effect of wood properties of hardwood on kraft paper properties*. Tappi J. 64(3) 123-130
13. Seth, R.S.; Page, D.H. (1988): *Fibre properties and tearing resistance*. Tappi J. 71(2) 103-110
14. Tamolang, F.N.; Wangaard, F.F.; Kellogg, R.M. (1968): *Hardwood fiber strength and pulp-sheet properties*. Tappi J. 51(1) 19-27
15. Wangaard, F.F.; Williams, D.L. (1970): *Fiber length and fiber strength in relation to tearing resistance of hardwood pulp*. Tappi J. 53(11) 2153-2160
16. Paavilainen, L. (1993): *Importance of cross-dimensional fiber properties and coarseness for the characterization of softwood sulphate pulp*. Paperi ja Puu. 75(5) 35-43
17. Kerekes, R.J. (2005): *Characterizing refining action in PFI mills*. Tappi J. 4(3) 9-13
18. Jang, H.F.; Seth, R.S. (2004): *Determining the mean values for fiber physical properties*. Nordic Pulp and Paper Research Journal. 19(3) 372-378
19. Metso Automation. (2001): *FiberLab® Research-quality fiber measurement for mill process management*. Leaflet
20. Jotuni, P.; Laasonen, P.; Lehtikoski, O. *Matematiikka*. In Jotuni P. (editor): Tekniikan Käsikirja 2, Gummerus: Jyväskylä, Finland, 1967
21. Richardson, J.D.; Riddell, M.J.C.; Burrell, P. (2003): *Experience with the FiberLab™ V 3.0 analyser for measuring fibre cross-section dimensions*. Appita J. 56(3) 315-322
22. Paavilainen, L. (1990): *Importance of particle size- fiber length and fines- for the characterization of softwood kraft pulp*. Paperi ja Puu. 72(5) 516
23. Crowley, J.C.; Kyu, Y.C. (1997): *Calculation of Molecular Weight Distribution from Molecular Weight moments in Free Radical Polymerization*. Ind. Eng. Chem. Res. 36 1419-1423
24. Milton, J.S.; Arnold, J.C.; *Introduction to probability and statistics*, McGraw-Hill: New York, 1995
25. Pulkkinen, I.; Ala-Kaila, K.; Aittamaa, J. (2006): *Characterization of wood fibers using fiber property distributions*. Chemical Engineering and Processing. 45(7) 546-554
26. Randolph, A. D.; Larson, M.A.; *Theory of particulate processes*, Academic Press: San Diego, 1988
27. Johnston, R.E.; Li, M.; Walsh, R. (2003): *Eucalyptus fibre size fractions: modelling and measuring their effect on sheet properties*. Appita 57th, Melbourne, Australia, 587-593
28. Kärenlampi, P. (1995): *Effect of distribution of fibre properties on tensile strength of paper; a closed-form theory*. J. Pulp Pap. Sci. 21(4) J138-J143
29. Uesaka, T.; Ferahi, M.; Hristopoulos, D. (2001): *Transactions of the 12th Fundamental Research Symposium*, edited by C.F. Baker, Vol. 2, Oxford, UK, Sept. 2001, 1423-1440