

Índice e direcção de rigidez versus difracção laser na quantificação da orientação das fibras no papel

Mário J.T. Pereira (1), Paulo T. Fiadeiro (2)

(1) Lic. Física dos Materiais (UA), PhD Física (UBI)

(2) Eng. Electrotécnico (IST), PhD Física (LUT – UK)

Unidade de Detecção Remota - Departamento de Física, Centro de Óptica

Universidade da Beira Interior, 6201-001 Covilhã – Portugal

Resumo

A distribuição de orientação das fibras é um parâmetro muito importante para a indústria do papel. Muitas fábricas de papel utilizam as técnicas ultrasónicas para quantificarem o índice de rigidez (TSI) da folha de papel, assumindo que este valor do TSI é igual ao valor da anisotropia de orientação das fibras no papel. Esta suposição só é verdadeira quando se permite que a folha de papel seque sem estar sujeita a tensões internas ou elongações, o que não é o caso para os papéis produzidos nas máquinas de papel, onde as tensões internas e as elongações estão presentes devido ao processo de fabrico. Para se colmatar este problema e aceder unicamente à anisotropia de orientação das fibras nas superfícies da folha de papel, foi implementada uma nova técnica, na qual o problema das tensões e elongações não se coloca. Essa técnica está baseada na difracção laser através de réplicas das superfícies da folha de papel. Neste trabalho foram analisados cinco papéis de impressão diferentes existentes no mercado nacional, primeiro através da técnica ultrasónica e depois através da técnica da difracção laser. Os resultados que serão apresentados neste trabalho serão demonstrativos dos problemas que existem na quantificação da anisotropia de orientação das fibras quando se utiliza a técnica ultrasónica. Os resultados para a anisotropia de orientação das fibras foram obtidos sobre o mesmo conjunto de amostras de papel. Foi encontrada uma baixa correlação entre os resultados obtidos através das duas técnicas utilizadas, uma vez que a gama de resultados obtidos para o TSI é limitada, não existindo para além disso nenhuma linearidade entre os resultados.

Palavras-Chave: Distribuição da orientação das fibras, anisotropia das fibras, TSI, TSO, difracção laser de réplicas superficiais.

Introdução

Devido ao processo de fabrico o papel apresenta uma estrutura anisotrópica (Schaffnit *et al.*, 1992; Drouin & Gagnon, 1993; Drouin *et al.* 1995). A maior parte dessa anisotropia resulta da distribuição das fibras à superfície da folha. A resistência mecânica dos produtos papeleiros depende fortemente da distribuição de orientação (Niskanen & Sadowski, 1989). Variações na orientação das fibras na folha de papel contribuem para a instabilidade dimensional, para diferenças na porosidade e rugosidade e para a diminuição das propriedades mecânicas no papel acabado (Thorpe, 1989; Sadowsky, 1979). Devido à importância da distribuição de orientação das fibras no papel (Dodson & Fekih, 1991; Dodson & Schaffnit, 1992; Koran & Prud'homme, 1982), métodos quantitativos para medir a orientação das fibras são de especial relevância para a indústria papeleira (Koran & Prud'homme, 1982; Silvy & Herve, 1982; Danielsen & Sttenberg, 1942; Mignot, 1998; Mercer, 1988; Lindblad, 1999).

Durante alguns anos para a determinação aparente da orientação das fibras, foram aplicados métodos ou técnicas utilizando a difusão da luz laser. Estes métodos quantificavam as propriedades ópticas das fibras para determinar a sua orientação. Contudo, a difusão da luz laser é limitada pela gramagem e pelo revestimento dos papéis, resultante das dificuldades de se obter uma boa

transmissão da luz laser através da folha de papel (Titus, 1994). Por outro lado, a técnica ultrasónica que quantifica o índice de rigidez nas direcções máquina (MD) e transversal (CD) (TSI_{MD} e TSI_{CD}) recebeu por parte da indústria do papel uma grande aceitação como ferramenta de acesso às performances do equipamento e dos produtos (Hess & Brodeur, 1996; Lindblad, 1999 (a); Lindblad, 1999 (b); TITUS, 1994; Watherhouse, 1994; Zumeren *et al.*, 1987;). A vantagem desta técnica é que não está limitada pela gramagem e revestimento do papel, nem pelas propriedades ópticas e pode ser usada na grande maioria dos papéis comerciais. A técnica é no entanto afectada pelo stress e tensão de secagem (Titus, 1994; Hess, Brodeur, 1996, Waterhouse, 1994). A aplicação tradicional envolve a determinação da orientação e anisotropia das fibras da folha de papel através da medição da rigidez em várias direcções. A orientação principal da rigidez é comumente interpretada como uma medida indirecta da orientação preferencial das fibras. Contudo, com esta técnica, após a secção da formação, as variáveis introduzidas no processo não são consideradas, e a orientação principal da rigidez não coincide com a orientação preferencial das fibras (Hess & Brodeur, 1996; Lindblad, 1999; Watherhouse, 1994; Zumeren *et al.*, 1987). A máquina de papel introduz tensões e elongações nas fibras, que vão aumentando na secção de prensagem, acentuando-se ainda mais na secção de secagem. O valor do TSI só seria igual à anisotropia das fibras se o papel fosse deixado secar sem quaisquer tensões e elongações, o que não acontece nos papéis manufacturados numa máquina de papel. A técnica ultrasónica consegue identificar as direcções de rigidez máxima e mínima bem como o ângulo que a direcção de rigidez máxima faz com a direcção máquina do papel, sendo esse ângulo referido como ângulo TSO.

Para resolver os problemas com a gramagem, revestimentos, stress e tensões de secagem, e para se quantificar unicamente a distribuição geométrica da orientação das fibras, foi proposta e implementada uma nova técnica baseada na difracção laser (Fiadeiro *et al.*, 2002; Pereira, 2002). A técnica utiliza réplicas das superfícies da folha de papel para produzir um padrão de difracção laser. Este padrão revela uma forma elíptica, devida à anisotropia da orientação das fibras da superfície do papel. Medindo a elipticidade do padrão de difracção e o desvio do seu eixo maior relativamente à direcção máquina, quantifica-se a distribuição da orientação das fibras (anisotropia e ângulo). A técnica da difracção laser foi validada usando-se um conjunto de papéis de referência produzidos pela École Française de Papeterie et des Industries Graphiques de Grenoble (EFPG) (Fiadeiro *et al.*, 2002; Pereira, 2002).

Este artigo apresenta e estabelece uma comparação entre as medições obtidas para a orientação das fibras em cinco folhas de papel comercial diferentes usando-se a técnica ultrasónica e a técnica da difracção laser.

Métodos

Foi seleccionado um conjunto de cinco amostras de papel do mercado (papel de impressão branco, 80 g/cm^2), para ser medido pelas duas técnicas. Em primeiro lugar com uma unidade L&W Autoline 200 quantificaram-se a orientação do índice de rigidez e as propriedades elásticas das amostras. Esta unidade consiste num sensor múltiplo contendo oito pares de transmissores/receptores. O princípio de medição está baseado num sinal de um pulso ultrasónico que é transmitido no plano da folha de papel (Lindblad, 1999). O tempo de transmissão entre o transmissor e o receptor, em oito direcções, é registado sendo então calculada a velocidade de propagação do sinal. Conhecida a velocidade da propagação do pulso ultrasónico através do plano da folha de papel, determina-se o valor de TSI (Titus, 1994; Waterhouse, 1999; Hess & Brodeur, 1996; Lorentzen & Wettre *Handbook*, 1999). Medindo o tempo que cada pulso ultrasónico demora a chegar do emissor ao receptor para cada uma das direcções no plano da folha de papel, determina-se o valor de TSI em todas direcções da folha. O resultado pode ser apresentado como uma representação polar do índice de rigidez (Titus, 1994). Com esta representação é possível

identificar a direcção onde a rigidez é máxima (TSI_{MAX}), e a diferença entre a direcção máquina da folha e a direcção de TSI_{MAX} , referida como ângulo TSO.

Após a análise com a técnica ultrasónica, das amostras de papel foram produzidas réplicas das suas superfícies para serem analisadas pela técnica da difracção laser (Fiadeiro *et al.*, 2002; Pereira *et al.*, 2001; Pereira, 2002). A distribuição de orientação das fibras (anisotropia e ângulo de orientação) para ambas as superfícies das folhas foi medida tal como se encontra descrito em Fiadeiro *et al.*, 2002 e Pereira, 2002. Esta técnica está baseada na análise de padrões de difracção de réplicas transparentes das superfícies da folha de papel. Os padrões assim obtidos revelam uma forma elíptica com uma elipticidade e orientação específicas, com o eixo maior da elipse perpendicular à orientação principal das fibras no papel. A elipticidade do contorno do padrão de difracção representa a anisotropia da distribuição das fibras e a direcção do eixo maior representa a orientação das fibras relativamente à MD. Estes dois parâmetros representam a distribuição de orientação das fibras nas folhas de papel.

Resultados Experimentais

De forma a estabelecer uma comparação entre a técnica ultrasónica e a técnica da difracção laser, foram realizadas medições da anisotropia e do ângulo de orientação para cada uma das amostras de papel. As medições ultrasónicas realizadas directamente nas folhas de papel dão a razão $TSI_{MD/CD}$ (a anisotropia do papel) e o ângulo TSO (o ângulo de orientação das fibras). Os resultados obtidos através da técnica da difracção laser, de réplicas transparentes das mesmas amostras de papel utilizadas com a técnica anterior, dão a anisotropia e o ângulo de orientação para as superfícies da folha de papel.

Na tabela 1 encontram-se compilados os resultados das anisotropias e dos ângulos de orientação obtidos através da técnica ultrasónica. Na tabela 2 encontram-se os resultados das anisotropias e ângulos de orientação, bem como os correspondentes desvios padrão para a técnica da difracção laser.

As duas tabelas anteriores permitem realizar um estudo de correlação entre os dois métodos. Essa correlação compreende uma regressão linear de forma a calcular o factor de correlação, R^2 .

Tabela 1: Resultados da técnica ultrasónica para as amostras de papel – no volume.

<i>Técnica Ultrasónica</i>				
Id. da amostra	$TSI_{MD/CD}$	desv. pad.	Âng. TSO (°)	desv. pad. (°)
P ₁	2,250	0,025	7,070	1,093
P ₂	2,479	0,027	2,861	0,669
P ₃	2,293	0,036	1,041	0,728
P ₄	2,254	0,031	0,678	0,573
P ₅	2,366	0,011	1,781	0,601

Tabela 2: Resultados da análise de difracção para as amostras de papel – face superior e face inferior.

<i>Técnica da Difracção Laser</i>								
Id. da amostra	Face superior				Face inferior			
	Anisot.	desv. pad.	Ângulo (°)	desv. pad. (°)	Anisot.	desv. pad.	Ângulo (°)	desv. pad. (°)
P ₁	1,314	0,044	3,685	4,226	1,299	0,031	1,860	2,909
P ₂	1,324	0,044	0,575	2,677	1,324	0,040	1,140	2,599
P ₃	1,324	0,045	0,665	2,187	1,309	0,042	0,230	2,478
P ₄	1,304	0,045	0,420	2,084	1,319	0,045	0,925	2,455
P ₅	1,373	0,056	0,130	1,600	1,339	0,040	0,290	2,449

Os resultados obtidos através da técnica ultrasónica correspondem a uma análise no volume das amostras de papel. Para se poder comparar estes resultados com os da técnica da difracção laser, que dizem respeito só à superfície das amostras, calculou-se o valor médio dos resultados obtidos para a anisotropia, pela difracção laser, para as faces superiores e inferiores de cada uma das amostras de papel, para ser representativo da anisotropia da totalidade da amostra de papel (ver tabela 3).

Tabela 1: Compilação dos resultados das medições da anisotropia e ângulo de orientação, para ambas as técnicas.

Identif. da amostra	<i>Técnica da Difracção Laser</i>				<i>Técnica Ultrasónica</i>			
	(médias: faces superior + inferior)				(no volume da folha)			
	Anisot.	desv. pad.	Ângulo (°)	desv. pad. (°)	TSI _{MD/CD}	desv. pad.	Âng. TSO (°)	desv. pad. (°)
P ₁	1,307	0,027	2,773	2,565	2,250	0,025	7,070	1,093
P ₂	1,324	0,030	0,858	1,865	2,479	0,027	2,861	0,669
P ₃	1,317	0,031	0,448	1,652	2,293	0,036	1,041	0,728
P ₄	1,312	0,032	0,673	1,610	2,254	0,031	0,678	0,573
P ₅	1,356	0,035	0,210	1,463	2,366	0,011	1,781	0,601

Na figura 1 apresenta-se a correlação entre os resultados obtidos para TSI_{MD/CD} e para a anisotropia média das folhas, enquanto que na figura 2 é apresentada a correlação entre os valores obtidos para o ângulo TSO e o ângulo de orientação das fibras, relativos às duas técnicas: ultrasónica vs. difracção laser.

Dos gráficos apresentados nas figuras 1 e 2 conclui-se que os factores de correlação entre os resultados obtidos é muito baixo, tornando-se claro a não existência de uma linearidade entre as duas técnicas. De salientar que em trabalhos anteriores (Fiadeiro *et al.*, 2002), foi obtida uma boa correlação entre as técnicas aqui estudadas, só que nesse trabalho a gama de anisotropias das amostras de papéis em estudo era bastante grande. A tendência dos estudos efectuados permite concluir que a correlação se torna mais significativa quando as variações de TSI são maiores, do

que no caso em que os valores de TSI são muito próximos. Que é o caso dos papéis comerciais em que os valores da anisotropia de orientação das fibras são muito próximos uns dos outros.

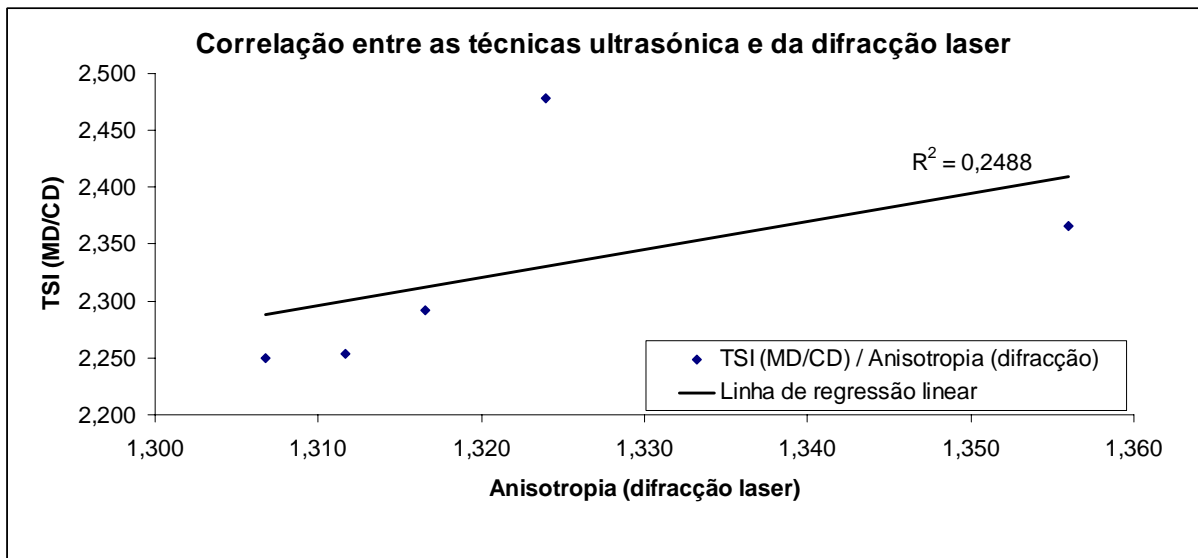


Figura. 1 – Gráfico de correlação entre os resultados $TSI_{MD/CD}$ e a anisotropia média das amostras.

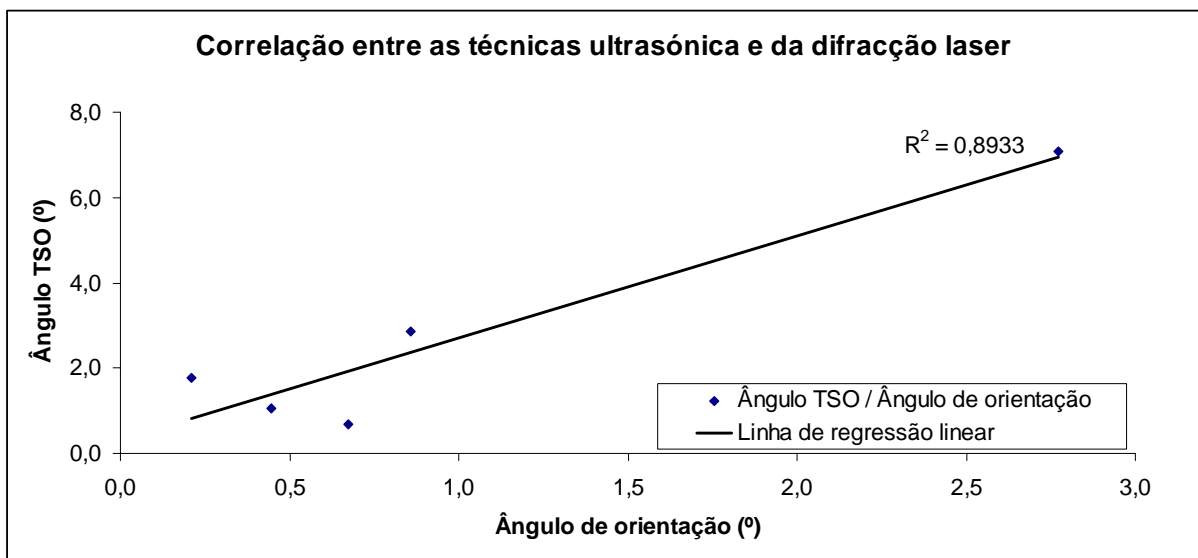


Figura. 2 - Gráfico de correlação entre aos resultados para o ângulo TSO e o ângulo de orientação das fibras

Conclusões

Dos resultados obtidos para a orientação das fibras, com a técnica baseada na análise de padrões de difracção laser produzidos por replicas transparentes das superfícies da folha de papel, pode concluir-se que a referida técnica é precisa e extremamente sensível a pequenas alterações na distribuição de orientação das fibras no papel, em contraponto à técnica ultrasónica que não apresenta grande sensibilidade a pequenas variações na orientação das fibras.

Em trabalhos anteriores a técnica da difracção laser foi correlacionada com outras técnicas utilizadas na quantificação da distribuição de orientação das fibras em papel (Fiadeiro *et al.*, 2002;

Pereira *et. al*, 2001; Pereira, 2002). As conclusões obtidas foram de que a técnica da difracção laser apresentava excelentes correlações quando comparada com as outras técnicas e que as réplicas obtidas das superfícies das amostras de papel eram cópias fidedignas do original.

Do presente trabalho pode concluir-se que as tensões e elongações existentes na estrutura dos papéis produzidos em máquinas de papel, influenciam as medições ultrasónicas, sendo obtidos valores para a anisotropia sempre acima da média. Para folhas de papel com anisotropias muito semelhantes, o método ultrasónico não tem resolução suficiente para produzir resultados satisfatórios.

A facilidade de operação conseguida com o método da difracção laser na obtenção de resultados superficiais da anisotropia e da orientação das fibras, aliada à sua precisão e elevada reprodutibilidade de resultados torna este método uma boa contribuição para a investigação e desenvolvimento de estruturas fibrosas, em particular para a estrutura do papel.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Unidade de Detecção Remota da Universidade da Beira Interior e à RAIZ - Instituto de Investigação da Floresta e Papel pelo apoio prestado.

Referências

Danielsen R., Sttenberg B., “Quantitative Determination of Fibre Orientation,” *Svensk Papperstidning* **13**, vol. 50, pp. 301-305 (1947).

Dodson C. T. J., Fekih K., “The Effect of Fibre Orientation on Paper Formation,” *Journal of Pulp and Paper Science* **6**, vol. 17, pp. J203-J206 (1991).

Dodson C. T. J., Schaffnit C., “Flocculation and Orientation Effects on Paper-formation Statistics,” *Tappi Journal*, pp. 167-171, January (1992).

Drouin B., Gagnon R., “Optical measurement of paper fibre orientation,” *Optical Engineering*, vol. 32, nº 9, 2138-2142, 1993.

Drouin B., Gagnon R., Schroder A., Butel M, Silvy J., “L’Orientation des Fibres et les Propriétés Mécaniques du Papier: Méthodes de Contrôle de l’Anisotropy de la Feuille,” *Revue A.T.I.P.* **2**, vol. 49, pp. 66-72 (1995).

Fiadeiro P.T., Pereira M.J., M.E.P. Jesus, Silvy J., “Laser diffraction to measure the anisotropy and the fibre orientation in fibre webs”, accepted for publication in *Journal of Pulp and Paper Science*.

Hess, Brodeur, “Effects of Wet Straining and Drying on Fibre Orientation and Elastic Stiffness Orientation,” *Journal of Pulp and Paper Science*, **22**, 5, pp. J160-J164 (1996).

Koran Z., Prud’homme R., “A study on Orientation and Curl,” *Tappi* **8**, vol. 65, pp. 88-91 (1982)

Lindblad G., “Ultrasonic Measurement – A Reliable Method for the Quality Control of Paper,” *Lorentzen &Wetretre Handbook, Paper Testing and Process Optimization*, pp. 13-19 (1999).

Mercer P. G., “On-line Instrumentation for Wet-End Control,” *Appita* **4**, vol. 41, pp. 308-312 (1988).

Mignot L., “Effect de l’ Orientation Fibreuse au Niveau Microscopique sur les Proprietes du Papier au Niveau Macroscopique: Developpment de Methods de Mesure de l’Orientation Fibreuse par Analyse d’Image,” *Diplome de Recherche Technologique, Institut National Polytechnique de Grenoble, Nippon Paper Industries Ltd., Central Research Laboratory* (1998).

- Niskanen K. J., Sadowski J. W., "Evaluation of some Fibre Orientation Measurements," *Journal of Pulp and Paper Science*, 15, 6, pp. J220-J224 (1989).
- Pereira, M.J.T., Fiadeiro, P.T., SILVY, J.J., "Paper surface diffraction to characterise the fibre orientation distribution", *SPIE Proceedings 4448-24*: 159, (2001).
- Pereira, M.J.T., "Reconhecimento do Padrão Óptico da Estrutura da Folha de Papel", Tese de Doutoramento, UBI, Julho de 2002.
- Sadowski J. W., "Measurement of Fibre Orientation in Paper by Optical Fourier Transform," *Paperi ja Puu*, 9, pp. 588-595 (1979).
- Schaffnit C., Silvy J., C. T. J. Dodson, "Orientation density distributions of fibres in paper," *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 3, pp.121-128 (1992).
- Silvy J., Ph. Herve, "Formation de la Feuille: Influence de la Flocculation de la Longueur et da la Courbure des Fibres sur la Repartition Orientationnelle des Fibres et les Propriétés Physiques des Papiers," *Revue A.T.I.P.* 6-7, vol. 36, pp. 343-357 (1982).
- Thorpe J. L., "Exploring Fibre Orientation Within Copy Paper," 1999 TAPPI International Paper Physics Conference, pp. 447-458 (1999).
- Zumeren M. L., D. J. Young, C. C. Habeger, G. A. Baum, R. Treleven, "Automatic Determination of Ultrasound Velocities in Planar Materials," *Ultrasonics*, vol. 25, pp. 288-294 (1987).