

Técnica matricial de pontos: metodologia não convencional para determinação de propriedades mecânicas de *tissues*

Rubens Chaves de Oliveira*

Richard E. Mark**

Richard W. Perkins***

Com a crescente utilização de produtos à base de *tissues*, as indústrias produtoras vêm, a cada dia, enfrentando os desafios para otimizar custos de produção que, aliados a uma constante exigência de melhoria de qualidade, os possam manter competitivos no mercado consumidor. Em outras palavras, produtos mais baratos e de melhor qualidade têm exigido do fornecedor conhecimentos mais profundos das variações de propriedades, bem como sua forma de controle, desde o início de sua fabricação até a sua comercialização.

Os produtos à base de papel, os quais são considerados tipicamente de estrutura porosa e heterogênea, apresentam flutuações de qualidade como reflexo das variações de seus parâmetros estruturais, desde áreas milimetricamente localizadas até uma faixa mais ampla de repercussão. Os produtos à base de *tissues* são exemplos comuns destas situações, onde os mesmos são considerados, em geral, papéis de baixa gramatura e densidade, elevado volume específico e respectiva maciez, amplos poros refletindo em maiores comprimentos livres nas fibras com baixa intensidade de ligações. Estas

características fazem com que as técnicas mecânicas convencionais, sistemas óticos ou mesmo os acústicos atualmente disponíveis são difíceis e até mesmo impossíveis de serem utilizados para determinações e estudos mais detalhados de suas propriedades. Aliado também à grande dificuldade de manuseio, preparo, forma e dimensões de amostras e deficiências de procedimentos de testes é que nos levou ao estudo de desenvolvimento de uma nova técnica com potencial para determinações de comportamento mecânico desses tipos de papéis.

Nos próximos itens, é apresentado o desenvolvimento da técnica, incluindo preparo da amostra, procedimentos de aquisição de dados, processamento computadorizado e apresentação de resultados de folhas produzidas em laboratório e de dois tipos de *tissues* fabricados industrialmente.

Delineamento matricial e configuração da amostra

Na área papeleira, os testes uniaxiais de tensão em regime de tração têm sido considerados os mais utilizados para avaliar o comportamento mecânico de papéis. No entanto, quando amostras retangulares de papéis de média e baixa gramaturas são testadas, fenômenos de encurvaduras se manifestam e se propagam ao longo de toda a amostra. Estes fenômenos são comumente denominados *tension buckling* ou encurvaduras de tensões e ocorrem, principalmente e acentuadamente, em amostras de *tissues*, mascarando os testes e/ou gerando a não confiabilidade dos resultados obtidos. Portanto, a configuração da amostra re-

presenta um compromisso entre as teorias desenvolvidas e as considerações práticas geradas, as quais foram incorporadas no desenvolvimento da técnica matricial de pontos por extensivos estudos previamente realizados e já publicados (1). Naquele estudo, utilizando a metodologia de elementos finitos e na análise, elementos de formas isoparamétricas-lineares-quadrilaterais, quatro modelos de amostras foram investigadas (figura 1) de modo que o mapeamento das tensões através da estrutura das amostras fossem delineados e fornecessem subsídios para o estabelecimento da configuração da amostra a ser adotada sem os efeitos das tensões de encurvaduras que viessem inviabilizar os resultados obtidos com a técnica matricial de pontos. A figura 2 mostra a forma e dimensões das amostras utilizadas para a determinação do comportamento mecânico das folhas produzidas em laboratório e dos dois tipos de *tissues* industrialmente fabricados.

Os pincéis pressurizados têm sido considerados, em engenharia, arquitetura e artes, instrumentos de grande utilidade que permitem produzir efeitos de impressão de finas linhas até áreas de diferentes tonalidades (2). Em nosso trabalho, para maior conveniência, facilidade de manipulação e higienização do uso, uma chapa de polietileno (*Mylar film D 300*) dimensionada em 100 x 70 x 0,119 mm foi perfurada com instrumento de precisão apropriado, que permitiu produzir, na respectiva chapa, uma matriz de orifícios, com diâmetro de $90 \pm 10 \mu\text{m}$ e dispostos em linhas e colunas, constituindo, respectivamente, uma matriz de 25 x 17 orifícios, espaçados $1 \pm 0,005 \text{ mm}$ um

* Rubens Chaves de Oliveira, Universidade Federal de Viçosa.

** Richard E. Mark, College of Environmental Science & Forestry.

*** Richard W. Perkins, Syracuse University.

Trabalho apresentado no 28º Congresso Anual de Celulose e Papel da ABTCP, realizado em São Paulo - SP - Brasil, de 6 a 10 de novembro de 1995. Prêmio de Mérito ABTCP.

Figura 1: Modelos de corpos de prova com distribuição de tensões na direção (a) longitudinal e (b) lateral da amostra

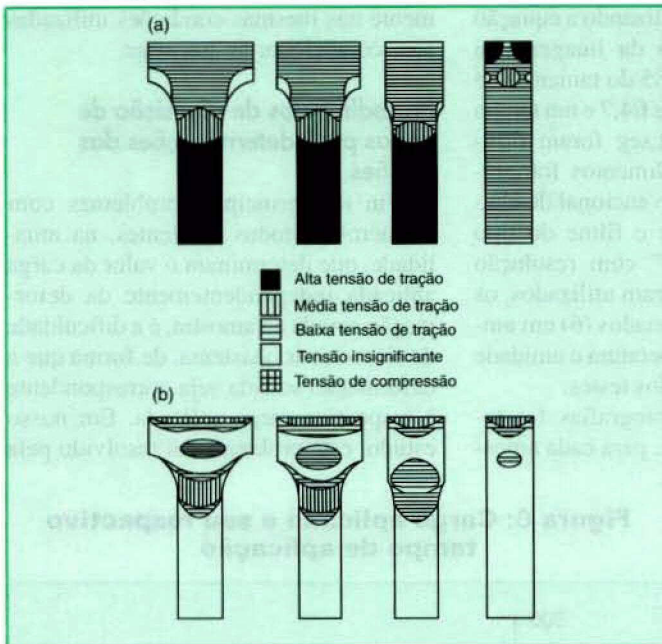
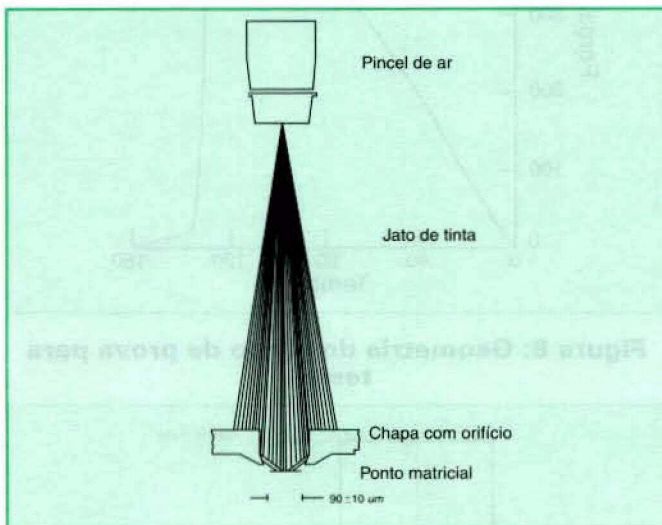


Figura 3: Vista da seção de formação de um ponto matricial



do outro. Mais duas colunas extras de 25 orifícios cada foram perfuradas para servirem como referência do alinhamento da chapa ao plano bi-dimensional da amostra. Esta chapa perfurada era sub-posicionada e alinhada geometricamente no plano x-y da região central da superfície da amostra, que com o auxílio de uma lupa microscópica se coincidia as colunas de referências, com os bordos laterais das mesmas. Um pincel de ar pressurizado (figura 3) era utilizado para imprimir uma matriz de pontos na região central das amostras, pela aplicação de um jato constante de tinta através dos

orifícios da chapa, constituindo uma matriz de 25 x 17 pontos, os quais totalizavam 425 pontos impressos por amostra. Com uma pressão de ar constante e manipulando o pincel de ar próximo à amostra, o procedimento é rápido e preciso, levando cerca de um minuto para imprimir totalmente uma matriz de pontos por amostra. As amostras foram preparadas em ambientes a $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ e $50 \pm 2 \%$ de umidade relativa.

Procedimentos de realização dos testes

Os testes foram realizados em regime

Figura 2: Corpo de prova utilizado e procedimento de amostragem para determinação da espessura

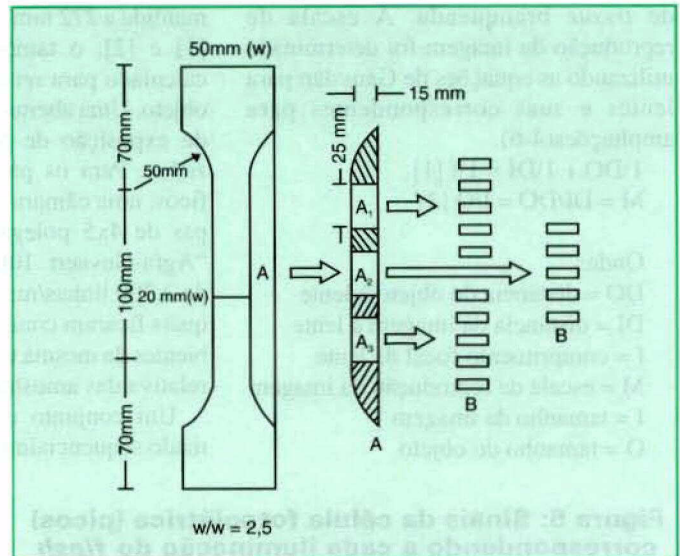
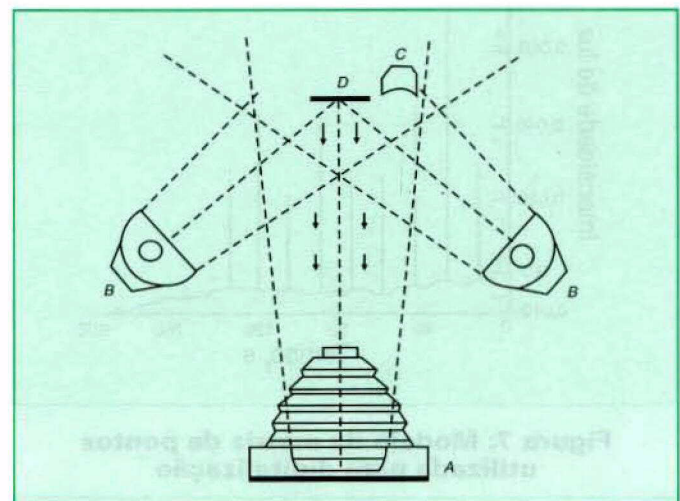


Figura 4: Arranjo fotográfico visto de cima



- A: Câmera fotográfica equipada com flash
- B: Iluminação fluorescente
- C: Célula fotoelétrica
- D: Corpo de prova

de tração em equipamento do tipo Instron com uma velocidade constante de aplicação de carga de 2 mm/min. Uma célula de carga com capacidade máxima de 10 Kg foi utilizada. Procedimentos especiais de fixação da amostra foram utilizados (3) de forma a prevenir deslize e desalinhamento da amostra nas garras do aparelho. Após a fixação da amostra no aparelho, uma câmera fotográfica (figura 4) é montada de modo que o filme fotográfico esteja corretamente focalizado e alinhado ao mesmo plano x-y, da matriz de pontos impressa na região central da amostra. Um fundo de

coloração azul foi utilizado para aumentar o contraste entre os pontos da matriz de coloração escura com a amostra de *tissue* branqueada. A escala de reprodução da imagem foi determinada utilizando as equações de Gaussian para lentes e suas correspondentes para ampliações(4-6).

$$\frac{1}{DO} + \frac{1}{DI} = \frac{1}{f} \quad [1]$$

$$M = DI/DO = I/O \quad [2]$$

Onde:

DO = distância do objeto à lente

DI = distância da imagem à lente

f = comprimento focal da lente

M = escala de reprodução da imagem

I = tamanho da imagem

O = tamanho do objeto

Em nosso trabalho, uma lente de comprimento focal de 135 mm foi utilizada e a distância (DO na equação [1]) foi mantida a 272 mm. Utilizando a equação [1] e [2], o tamanho da imagem foi calculado para ser 0,985 do tamanho do objeto. Uma abertura de f/4,7 e um tempo de exposição de 50m seg foram utilizados. Para os procedimentos fotográficos, uma câmara convencional de chapas de 4x5 polegadas e filme do tipo "Agfa-Gevaert 10E75" com resolução de 2.700 linhas/mm foram utilizados, os quais ficaram condicionados (6) em ambientes da mesma temperatura e umidade relativa das amostras dos testes.

Um conjunto de fotografias foi tomado sequencialmente, para cada amos-

tra, ao longo de todo o teste, até próximo ao ponto de ruptura. Após a revelação, os negativos foram condicionados novamente nas mesmas condições utilizadas para condicionar as amostras.

Procedimentos de aquisição de dados para determinações das tensões

Um dos principais problemas com inúmeros métodos existentes, na atualidade, que determinam o valor da carga aplicada independentemente da deformação gerada na amostra, é a dificuldade de sincronizar o sistema, de forma que a deformação sofrida seja correspondente à respectiva carga aplicada. Em nosso estudo, este problema foi resolvido pela

Figura 5: Sinais da célula fotoelétrica (picos) correspondendo a cada iluminação do flash

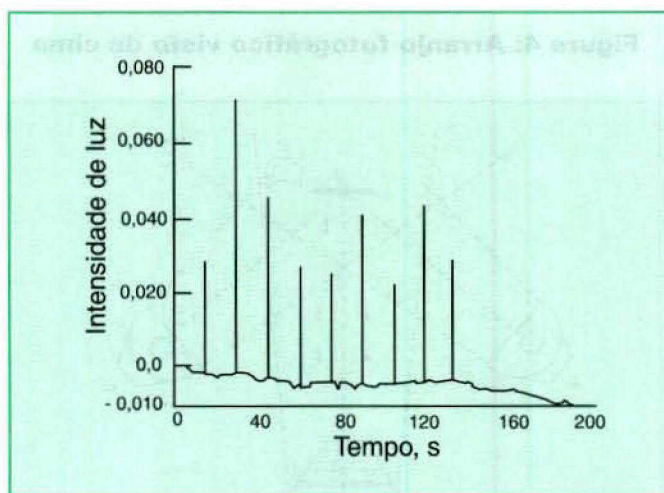


Figura 7: Modelo da matriz de pontos utilizada para digitalização

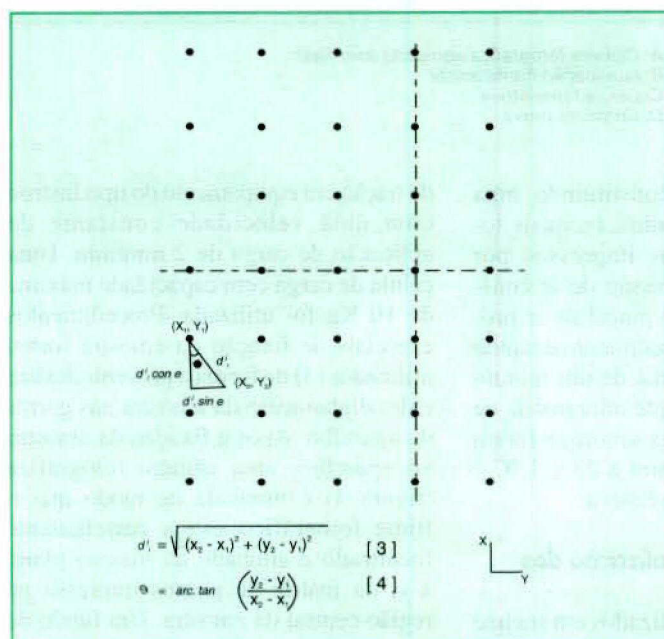


Figura 6: Carga aplicada e seu respectivo tempo de aplicação

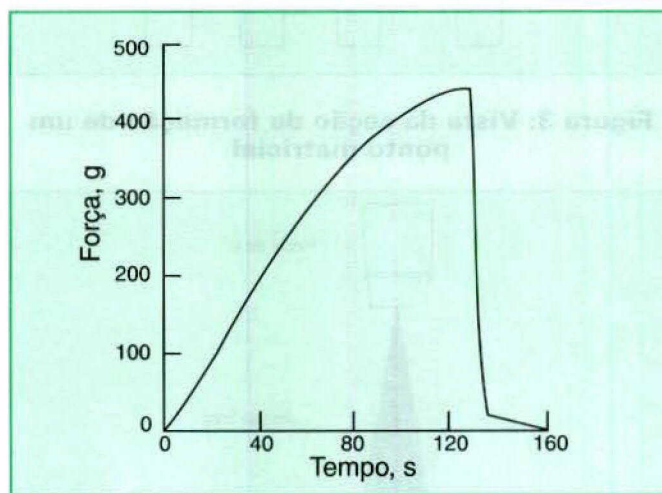
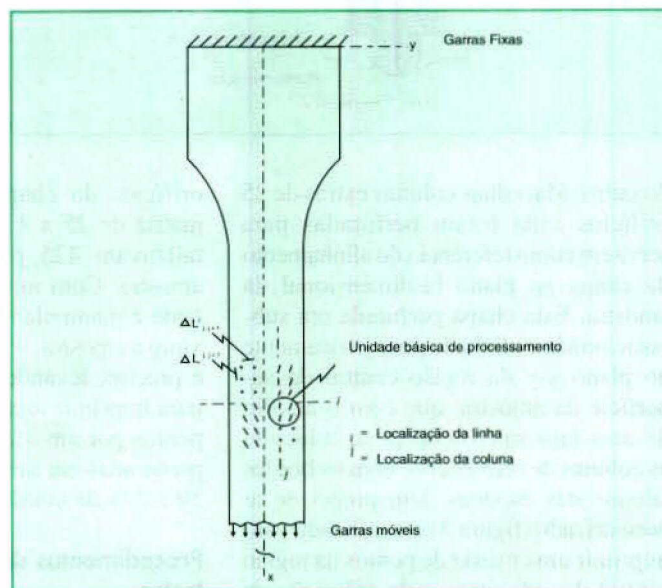
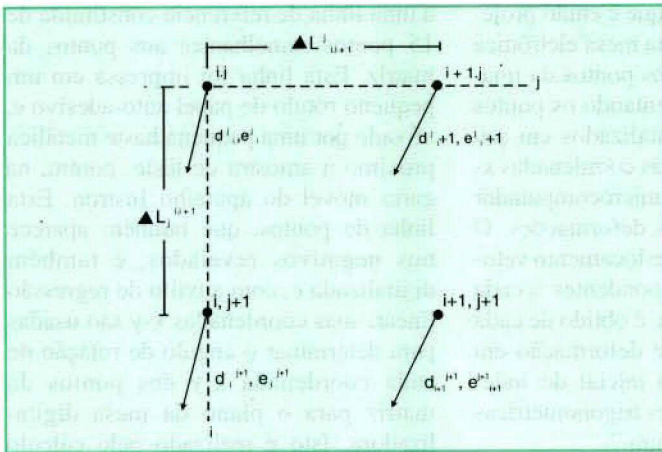


Figura 8: Geometria do corpo de prova para teste



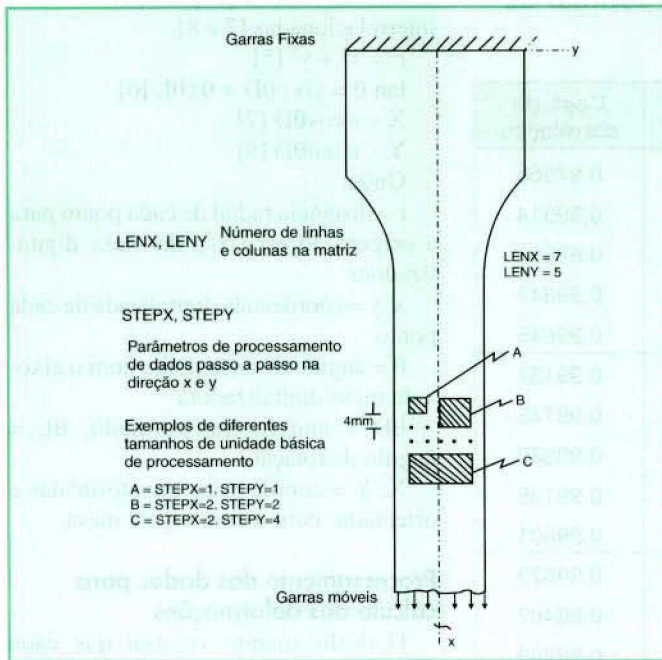
$\Delta L_{ij}^{(1)}$ = Espaço entre pontos em uma mesma linha
 $\Delta L_{ij}^{(2)}$ = Espaço entre pontos em uma mesma coluna

Figura 9: Unidade básica de processamento



$\Delta L_{i,j}^{i+1}$ = Espaço entre pontos em uma mesma linha
 $\Delta L_{i,j}^{j+1}$ = Espaço entre pontos em uma mesma coluna
 i, j = Localização da linha, i, j = Localização da coluna

Figura 11: Geometria e modelos de diferentes unidades de processamento

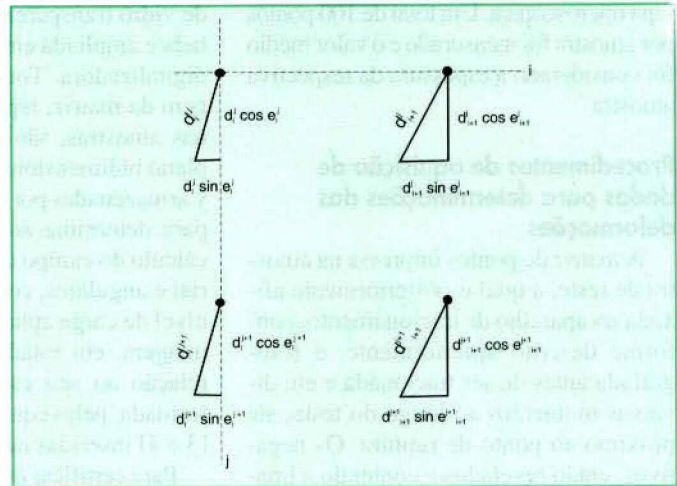


montagem de uma célula fotoelétrica próxima à amostra do teste (figura 4). Durante a realização dos testes, as respostas elétricas da célula de carga e da célula fotoelétrica eram captadas simultaneamente por um sistema eletrônico de aquisição de dados do tipo *Keithley-DAS* controlado por um microcomputador. Este procedimento nos permitiu identificar o valor da carga no momento em que cada fotografia era tomada. A rápida variação de iluminação da amostra, causada pelo *flash* eletrônico da câmera fotográfica, causava equivalente resposta em sinais eletrônicos na célula fotoelétrica. Um exemplo típico dessas variações de

intensidade de luz é mostrada na figura 5. Nesta figura, cada pico corresponde ao momento em que cada fotografia foi tomada. Obviamente, o número de picos corresponde ao número de fotografias tomadas por amostra ao longo do teste.

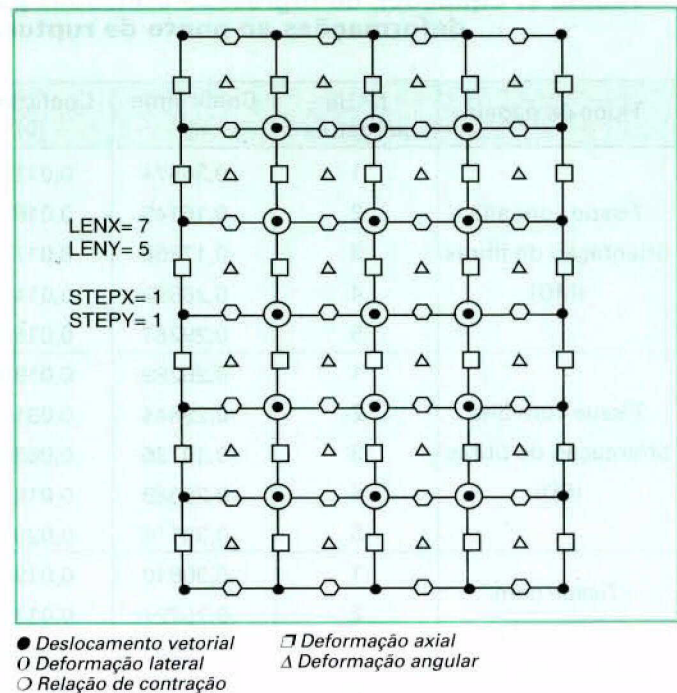
A figura 6 mostra a relação da carga aplicada na amostra e o seu respectivo tempo de aplicação, o qual é o mesmo tempo gasto para coletar os sinais eletrônicos da célula fotoelétrica. Embora um grande número de dados de aplicação de forças tenha sido coletado, apenas uma quantidade de dados equivalente ao número de fotografias tomadas foi necessária para determinar as tensões sofridas pela amostra.

Figura 10: Componentes dos deslocamentos vetoriais



i, j = Localização da linha, i, j = Localização da coluna

Figura 12: Quantidade e natureza de informações na matriz



Embora a largura da região central das amostras serem suficientemente amplas (20 mm), não foi possível utilizá-las para a determinação de suas respectivas espessuras, devido à característica de maciez, fragilidade e a facilidade de danificação da estrutura dos papéis *tissues*. Portanto, após o corte das amostras, as partes remanescentes (veja figura 2A) foram utilizadas para determinação de espessura e a respectiva área da seção transversal da amostra. Conforme exemplificado, a parte A na figura 2 foi dividida em outras parte menores A_1, A_2 e A_3 , as quais foram congeladas em nitrogênio líquido e, então, divididas igualmente em outras cinco partes, conforme parte B da respectiva

figura que permitiram a determinação de suas espessuras com o auxílio de uma lupa microscópica. Um total de 100 pontos por amostra foi mensurado e o valor médio foi considerado a espessura da respectiva amostra.

Procedimentos de aquisição de dados para determinações das deformações

A matriz de pontos impressa na amostra de teste, a qual é posteriormente afixada no aparelho de tracionamento, conforme descrito anteriormente, é fotografada antes de ser tracionada e em diversos momentos ao longo do teste, até próximo ao ponto de ruptura. Os negativos, então revelados e contendo a imagem da matriz de pontos, desde o estado de indeformada aos diversos estados de

deformação ao longo do teste, são alocados, um de cada vez, entre duas placas de vidro transparente, que é então projetada e ampliada em uma mesa eletrônica digitalizadora. Todos os pontos da imagem da matriz, representando os pontos nas amostras, são digitalizados em seu plano bidimensional e as coordenadas x-y armazenadas por um microcomputador para determinação das deformações. O cálculo do campo de deslocamento vetorial e angulares, correspondentes a cada nível de carga aplicada, é obtido de cada imagem, em estado de deformação em relação ao seu estado inicial de indeformada, pelas equações trigonométricas [3 e 4] inseridas na figura 7.

Para certificar que a imagem da matriz projetada se encontra em correto plano bidimensional com a mesa digitalizadora,

as coordenadas x-y de cada ponto individual na matriz é digitalizado em relação a uma linha de referência constituída de 15 pontos semelhantes aos pontos da matriz. Esta linha foi impressa em um pequeno rótulo de papel auto-adesivo e, afixado por uma pequena haste metálica próximo à amostra de teste, porém, na garra móvel do aparelho Instron. Esta linha de pontos, que também aparece nos negativos revelados, é também digitalizada e, com auxílio de regressão linear, suas coordenadas x-y são usadas para determinar o ângulo de rotação de cada coordenada x-y dos pontos da matriz para o plano da mesa digitalizadora. Isto é realizado pelo cálculo das coordenadas polares (r, θ) utilizando as equações [5 e 6] para cada ponto da matriz e, finalmente, determinando as respectivas coordenadas retangulares X, Y utilizando as equações paramétricas interrelacionadas [7 e 8].

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad [5]$$

$$\tan \theta = y/x; \theta D = \theta \pm \theta L \quad [6]$$

$$X = r \cos \theta D \quad [7]$$

$$Y = r \sin \theta D \quad [8]$$

Onde:

r = distância radial de cada ponto para a origem do eixo x-y da mesa digitalizadora

x, y = coordenada digitalizada de cada ponto

θ = ângulo de cada ponto com o eixo-x da mesa digitalizadora

θD = ângulo transformado, θL = ângulo de rotação

X, Y = coordenadas transformadas e orientadas com o eixo x-y da mesa.

Tabela 1: Equações de regressão utilizadas para estimar as deformações ao ponto de ruptura

Tipos de papéis	Nº de amostras	Coefficiente (a)	Coefficiente (b)	Coef. de correlação
<i>Tissue</i> com alta orientação de fibras (MD)	1	0,36574	0,01220	0,97965
	2	-0,16145	0,01675	0,99914
	3	-0,17366	0,01775	0,99913
	4	0,26392	0,01436	0,99647
	5	0,29261	0,01580	0,99645
<i>Tissue</i> com alta orientação de fibras (CD)	1	-0,26289	0,01949	0,99137
	2	-0,29544	0,03187	0,99745
	3	-0,10736	0,06389	0,99535
	4	-0,25069	0,01834	0,99135
	5	-0,36176	0,02013	0,99601
<i>Tissue</i> com moderada orientação de fibras (MD)	1	-0,30810	0,01987	0,99523
	2	-0,75227	0,01340	0,98482
	3	-0,46997	0,01462	0,99359
	4	-0,4216	0,01305	0,99358
	5	-0,43989	0,01485	0,99576
<i>Tissue</i> com moderada orientação de fibras (CD)	1	-0,01311	0,01576	0,99596
	2	0,04972	0,01560	0,99194
	3	-0,24954	0,02193	0,99148
	4	-0,07709	0,01880	0,99772
	5	0,25141	0,01394	0,99714
<i>Tissue</i> confeccionado em laboratório	1	-0,06249	0,01294	0,98975
	2	-0,01530	0,00841	0,99267
	3	-0,04776	0,01545	0,99575
	4	-0,10372	0,01101	0,99439
	5	-0,15707	0,01253	0,98744

Nota: As equações são da forma: $y = a + bx$, onde y = deformações em %; x = tempo de tracionamento em segundos

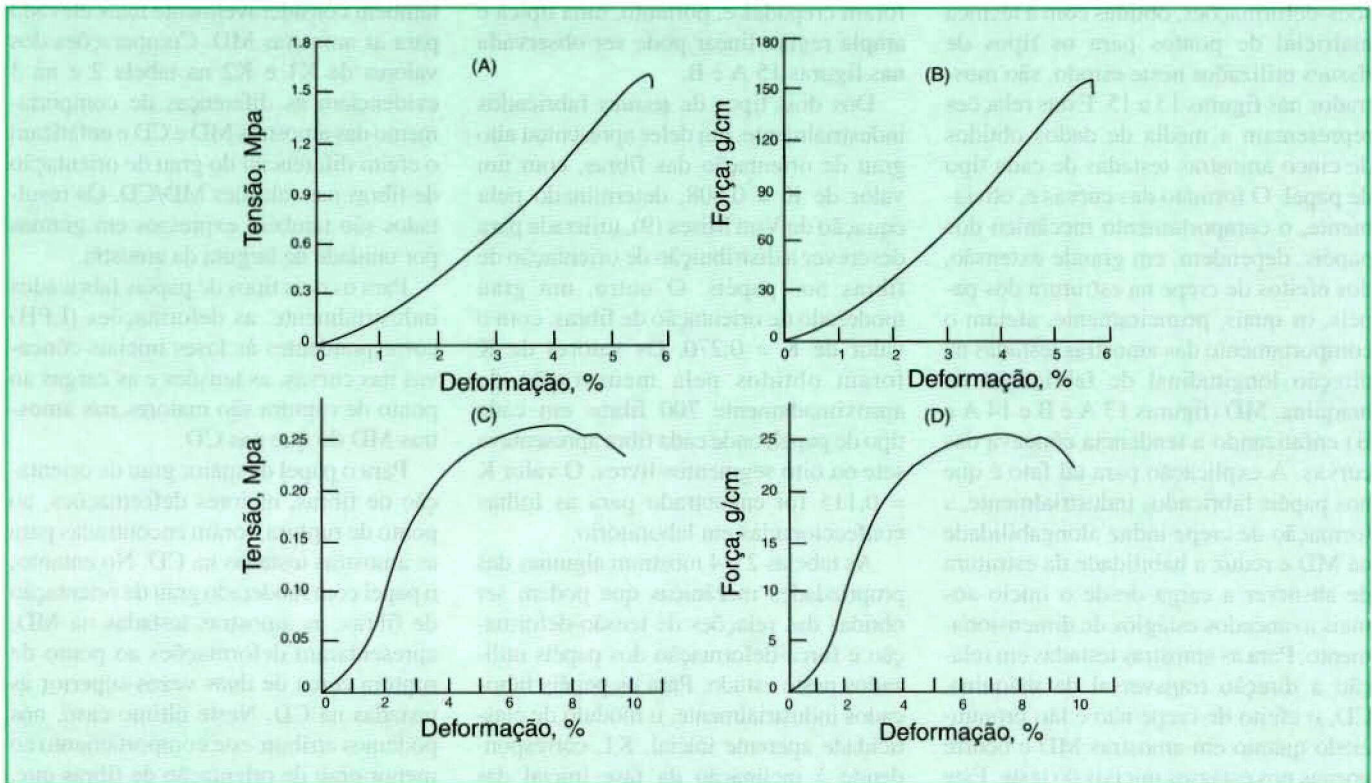
Processamento dos dados para cálculo das deformações

O deslocamento vetorial que cada ponto na matriz está sujeito com o tracionamento da amostra durante o teste é representado pelas setas mostradas na região central da amostra exemplificada na figura 8. Quando os componentes dos vetores deslocados são obtidos para toda a matriz, o campo de deformações pode ser determinado por relações de diferenças entre os componentes vetoriais. Os componentes vetoriais são calculados para cada unidade básica de processamento, como demonstrado nas figuras 9 e 10, utilizando a seguinte relação algorítmica diferencial:

$$(\epsilon_{xx})_{j,j} + \alpha = 1/\Delta L_j \cdot j + \alpha \{d_j + \alpha \cdot \cos \theta_j\} + \alpha - d_j \cdot \cos \theta_j \quad [9]$$

$$(\epsilon_{yy})_{i,i} + \beta = 1/\Delta L_i \cdot i + \beta \{d_j + \beta \cdot \sin \theta_j\} + \beta - d_j \cdot \sin \theta_j \quad [10]$$

Figura 13: Relações de tensões-deformações para o papel do tipo *tissue* com o mais alto grau de orientação de fibras - Figs. A e B direção MD; Figs. C e D direção CD



$$(\epsilon_{xy})_{i,j}^{i,j} + \beta^\alpha = 1/2 \{ [(d_j)_{i,\beta} \cdot \sin \theta_j + \alpha - d_j \cdot \sin \theta_j] / \Delta L_{i,j}^{\beta} + \alpha \} + [(d_j)_{i,\beta} \cdot \cos \theta_j + \beta - d_j \cdot \cos \theta_j] / \Delta L_{i,j}^{\beta} \quad [11]$$

Onde, $\alpha = \text{STEPX}$ e $\beta = \text{STEPY}$; para $1 \leq i \leq \text{LENY} - \beta$ e $1 \leq j \leq \text{LENX} - \alpha$

Com os métodos e algoritmos previamente descritos, podemos realizar as análises de deformações, em toda a extensão da matriz, na imagem de cada fotografia (negativo revelado). Após as determinações do campo de deformações, nas direções axial, lateral e diagonal da amostra, o círculo de Mohr (7) é utilizado para calcular o principal direcionamento vetorial e seus respectivos componentes das deformações pelas equações [12] e [13].

$$\theta_p = 1/2 \arctan[(\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})] \quad [12]$$

$$\epsilon_{p,xy}^{\pm} = 1/2(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) \pm \{ 1/4[(\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})^2 + \epsilon_{xy}^2] \}^{0.5} \quad [13]$$

Estas equações são utilizadas para processar cada unidade básica de dados, passo a passo em toda a matriz, ou seja, a unidade básica $[i,i+\text{STEPX};j,j+\text{STEPY}]$. Após este procedimento, o sistema calcula a relação de contração lateral (LCR) da amostra, a qual é simplesmente a relação entre os dois principais componentes de deformações no plano axial (ϵ_{xx}^{-1}) e lateral (ϵ_{yy}^{-1}) da amostra, conforme descrito pela equação [14].

$$\text{LCR} = -\epsilon_{yy}^{-1} / \epsilon_{xx}^{-1} \quad [14]$$

A matriz de pontos, aplicada na região

central da amostra, consistiu de 27 linhas e 17 colunas de pontos, conforme descrito anteriormente. Entretanto, neste trabalho apenas parte da matriz foi considerada no processamento dos dados, onde apenas 7x5 pontos foram processados e os demais pontos desconsiderados. Neste caso, a distância entre os pontos na matriz, ou seja, o espaçamento entre eles, é de 4 mm, sendo suficiente para descrevermos o campo de deformações nestes tipos de papéis. O processamento dos pontos em espaçamentos menores é de grande utilidade em estudos de correlações das propriedades de deformações com os efeitos locais de variação de massa (gramatura), distribuição de flocos etc.

Exemplos de diferentes dimensões e formas de unidades básicas que podem ser processadas pelo sistema matricial de pontos é mostrado na figura 11. A quantidade e a natureza das informações que podem ser geradas pela técnica matricial de pontos é mostrada na forma de organograma de símbolos que dispostos em forma matricial é representado pela figura 12.

Determinações das relações tensões deformações

O comportamento mecânico de materiais sólidos, tais como papéis, pode

ser normalmente descrito pelas relações diferenciais térmicas, mecânicas e de umidade a que estão sujeitos, as quais induzem às respectivas deformações (8). Em nosso trabalho, os valores das deformações na direção axial da amostra, utilizada no eixo da abscissa para a confecção dos diagramas de relações de tensões-deformações das amostras testadas, foram obtidos processando os dados provenientes de dois pontos localizados na coluna central da matriz 7 x 5 pontos, os quais se localizam ao centro axialmente geométrico das amostras. O efeito de deslocamento vetorial, associado com o movimento rígido da amostra, foi removido dos cálculos utilizando a relação diferencial algorítmica, equação [9], a qual gera deformação axial $(\epsilon_{xx})_{i,j}^{i,j+\alpha}$, em valores absolutos em relação à distância referencial entre os dois pontos $\Delta L_{i,j}^{i,j+\alpha}$, onde $\alpha = \text{LENX} - 1$; $i = [(\text{LENY} - 1) \div 2] + 1$; $j = 1$; neste caso $\text{LENX} = 7$ E $\text{LENY} = 5$.

Devido à dificuldade de se fotografar a amostra no momento exato de ruptura, a deformação ao ponto de ruptura foi estimada por regressão linear, utilizando-se valores das deformações obtidas desde o início do teste até próximo ao ponto de ruptura. As equações de regressão utilizadas são mostradas na tabela 1.

Resultados obtidos das relações

tensões-deformações

Exemplos típicos de relações de tensões-deformações, obtidas com a técnica matricial de pontos para os tipos de *tissues* utilizados neste estudo, são mostrados nas figuras 13 a 15. Estas relações representam a média de dados obtidos de cinco amostras testadas de cada tipo de papel. O formato das curvas e, obviamente, o comportamento mecânico dos papéis, dependem, em grande extensão, dos efeitos de crepe na estrutura dos papéis, os quais, primeiramente, afetam o comportamento das amostras testadas na direção longitudinal de fabricação da máquina, MD (figuras 13 A e B e 14 A e B) enfatizando a tendência côncava das curvas. A explicação para tal fato é que nos papéis fabricados industrialmente, a formação de crepe induz alongabilidade na MD e reduz a habilidade da estrutura de absorver a carga desde o início aos mais avançados estágios de dimensionamento. Para as amostras testadas em relação a direção transversal da máquina, CD, o efeito de crepe não é tão pronunciado quanto em amostras MD e ocorre apenas nos estágios iniciais do teste. Este efeito aparece apenas na fase inicial côncava das curvas das figuras 13 C e D e 14 C e D. Estas curvas são típicas para todas as amostras CD testadas para os dois tipos de *tissues* fabricados industrialmente. Como esperado, este comporta-

mento não foi observado nas folhas confeccionadas em laboratório, as quais não foram crepadas e, portanto, uma típica e ampla região linear pode ser observada nas figuras 15 A e B.

Dos dois tipos de *tissues* fabricados industrialmente, um deles apresentou alto grau de orientação das fibras, com um valor de $K = 0,508$, determinado pela equação de Von Mises (9), utilizada para descrever a distribuição de orientação de fibras nos papéis. O outro, um grau moderado de orientação de fibras, com o valor de $K = 0,270$. Os valores de K foram obtidos pela mensuração de aproximadamente 700 fibras em cada tipo de papel, onde cada fibra apresentava sete ou oito segmentos livres. O valor $K = 0,115$ foi encontrado para as folhas confeccionadas em laboratório.

As tabelas 2 e 4 mostram algumas das propriedades mecânicas que podem ser obtidas das relações de tensão-deformação e força-deformação dos papéis utilizados neste estudo. Para os papéis fabricados industrialmente, o módulo de elasticidade aparente inicial, K_1 , correspondendo à inclinação da fase inicial das relações de tensão-deformação, o qual pode expressar o efeito do crepe no comportamento dos papéis em regime de tração, é maior para as amostras MD do que para as amostras CD. O módulo de elasticidade aparente, K_2 , determinado da

parte linear da relação tensão-deformação (após a região sob efeito do crepe) é também consideravelmente mais elevado para as amostras MD. Comparações dos valores de K_1 e K_2 na tabela 2 e na 3 evidenciam as diferenças de comportamento das amostras MD e CD e enfatizam o efeito diferencial do grau de orientação de fibras nas relações MD/CD. Os resultados são também expressos em gramas por unidade de largura da amostra.

Para os dois tipos de papéis fabricados industrialmente, as deformações (LPH) correspondentes às fases iniciais côncavas nas curvas, as tensões e as cargas ao ponto de ruptura são maiores nas amostras MD do que nas CD.

Para o papel de maior grau de orientação de fibras, maiores deformações, ao ponto de ruptura, foram encontradas para as amostras testadas na CD. No entanto, o papel com moderado grau de orientação de fibras, as amostras testadas na MD, apresentaram deformações ao ponto de ruptura cerca de duas vezes superior às testadas na CD. Neste último caso, nós podemos atribuir este comportamento ao menor grau de orientação de fibras que, aliado ao efeito de crepe, causam alongabilidade, principalmente na direção de fabricação da máquina. Nós atribuímos as diferenças de resultados, entre os dois tipos de papéis fabricados industrialmente, às diferenças de grau de orien-

Figura 14: Relações de tensões-deformações e forças-deformações para o papel do tipo *tissue* com moderado grau de orientação de fibras - Figs. A e B e direção MD; figs. C e D direção CD

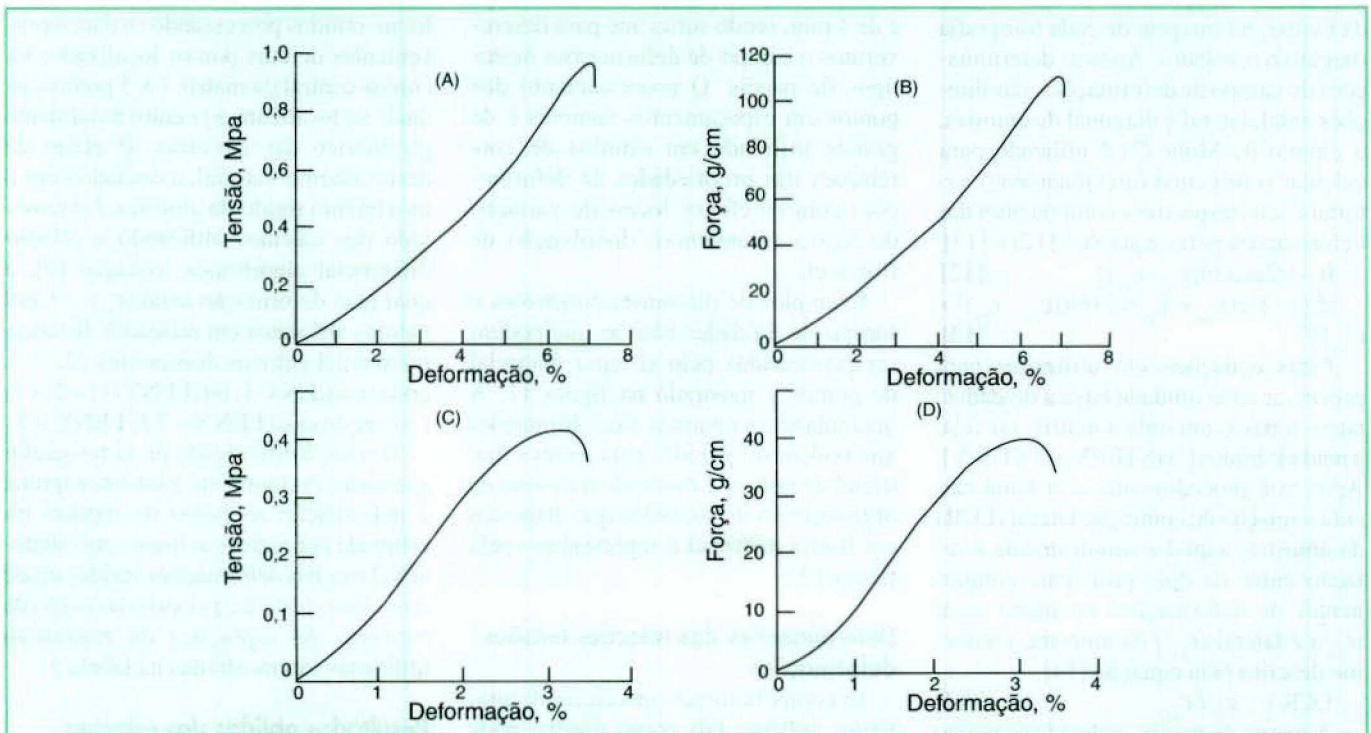
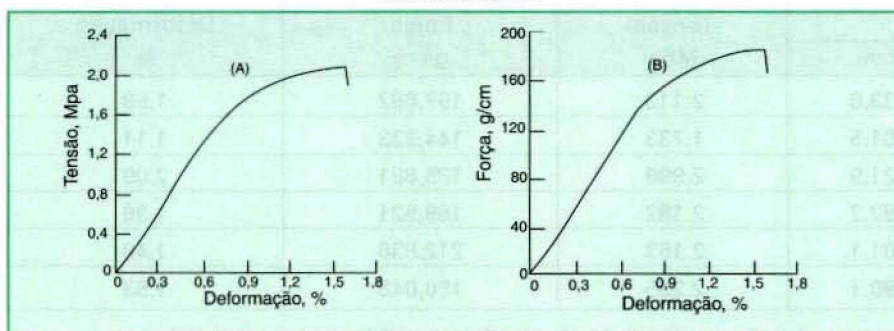


Figura 15: Relações tensões-deformações e forças-deformações para os papéis tissues confeccionados em laboratório



MD = Direção longitudinal de produção; CD = Direção transversal de produção; K1 = Módulo de elasticidade aparente inicial; K2 = Módulo de elasticidade aparente; LPH = deformação da parte côncava da curva tensão-deformação; TENSÃO = Tensão de ruptura; FORÇA = Força / Largura da amostra ao ponto de ruptura.

tação de fibras.

Se compararmos a tabela 4 com as tabelas 2 e 3 veremos que existe grande diferença nos valores de módulo de elasticidade entre as folhas confeccionadas em laboratório das fabricadas industrialmente. As folhas confeccionadas em laboratório resistem mais à deformação em razão das tensões aplicadas e, portanto, são mais rígidas que os dois tipos de *tissues* fabricados industrialmente. A possível explicação é que as confeccionadas em laboratório, normalmente, não sofrem crepagem e as fabricadas industrialmente, normalmente, são. Portanto, folhas confeccionadas em laboratório podem ser deficientes para prever o com-

Tabela 2: Módulo de elasticidade aparente, força, tensão e deformação das amostras de *tissue* fabricados industrialmente com alto grau de orientação de fibras

MD								
Nº de amostra	K1		K2		LPH %	Tensão MPa	Força g/cm	Deformação %
	MPa	g/cm	MPa	g/cm				
1	20.451	2091,97	40.765	4169,90	0,765	1,503	153,78	4,61
2	20.745	1876,68	36.742	3323,85	1,083	1,735	156,95	6,09
3	18.325	1917,20	38.228	3896,51	0,796	1,647	172,46	6,45
4	16.282	1585,20	37.569	3462,89	1,113	1,521	148,07	5,43
5	17.235	1533,07	40.625	3784,11	1,640	1,749	162,95	5,97
Média	18.608	1800,82	38.786	3727,45	1,080	1,631	158,84	5,71
CD								
1	2.354	220,47	8.320	779,07	0,856	0,283	26.524	7,94
2	2.133	187,58	7.701	677,32	0,665	0,245	21.509	7,17
3	1.313	128,89	8.277	812,49	0,888	0,309	30.378	9,70
4	2.209	220,43	8.938	891,91	0,958	0,251	25.022	7,49
5	2.002	219,18	8.054	882,30	0,825	0,237	25.935	7,49
Média	2.002	189,34	8.258	808,62	0,838	0,265	25.874	7,96

MD = direção longitudinal de produção; CD = direção transversal de produção; K1 = módulo de elasticidade aparente inicial; K2 = módulo de elasticidade aparente; LPH = deformação da parte côncava da curva tensão-deformação; tensão = tensão de ruptura; força = força/largura da amostra ao ponto de ruptura

Tabela 3: Módulo de elasticidade aparente, força, tensão e deformação das amostras de *tissue* fabricados industrialmente com moderado grau de orientação de fibras

MD								
Nº de amostra	K1		K2		LPH %	Tensão MPa	Força g/cm	Deformação %
	MPa	g/cm	MPa	g/cm				
1	8.500	913,99	18.757	1821,47	2,496	0,945	89.214	9,72
2	9.278	901,02	23.017	2235,18	0,694	0,860	83.546	6,01
3	13.452	1119,87	26.772	2228,76	2,249	1,734	144.328	7,01
4	12.577	1269,19	24.460	2468,35	1,813	1,277	128.864	6,22
5	10.959	1089,08	24.097	2394,68	2,239	1,112	110.547	7,04
Média	10.953	1058,63	23.421	2394,69	1,898	1,186	111.300	7,20
CD								
1	4.878	459,65	17.175	1620,90	0,357	0,387	36.551	3,19
2	5.148	459,80	18.754	1674,86	0,398	0,422	39.438	3,121
3	4.283	369,80	16.183	1397,09	0,427	0,438	37.805	3,60
4	5.515	566,15	17.624	1809,09	0,288	0,451	46.315	3,46
5	5.248	551,22	17.072	1898,15	0,245	0,359	37.805	2,71
Média	5.013	481,32	17.562	1680,02	0,343	0,415	39.583	3,23

MD = direção longitudinal de produção; CD = direção transversal de produção; K1 = módulo de elasticidade aparente inicial; K2 = módulo de elasticidade aparente; LPH = deformação da parte côncava da curva tensão-deformação; tensão = tensão de ruptura; força = força/largura da amostra ao ponto de ruptura

Tabela 4: Módulo de elasticidade aparente, força, tensão e deformação das amostras de *tissue* confeccionadas em laboratório

Nº de amostra	K1		Tensão MPa	Força g/cm	Deformação %
	MPa	g/cm			
1	210,94	19.733,8	2.113	197,662	1,59
2	217,37	18.101,5	1.733	144,323	1,11
3	214,95	17.321,9	2.998	185,881	2,09
4	212,95	18.492,2	2.182	189,521	1,36
5	210,44	20.801,1	2.153	212,836	1,48
Média	213,33	18.890,1	2.235	186,045	1,53

K = módulo de elasticidade; tensão = tensão de ruptura; força = força/largura da amostra ao ponto de ruptura; deformação = ao ponto de ruptura

portamento mecânico de papéis do tipo *tissues* fabricados industrialmente.

Resultados da caracterização dos campos de deformações

Na seção anterior, foram mostrados resultados de propriedades mecânicas obtidas das relações tensões-deformações. Neste item, os resultados obtidos mostram que a técnica é capaz de quantificar, em um campo bidimensional da amostra, as distribuições de deformações e suas variações ponto por ponto na matriz, bem como as relações de contração lateral da amostra, ao longo de todo o processo de tracionamento.

A característica de heterogeneidade das estruturas dos papéis é bem conhecida na literatura (9-13).

Variações em distribuição de massa, espessura, comprimento livre na fibra, distribuição de orientação de fibras, tamanho, forma e distribuição de flocos e intensidade de ligação interfibras, as quais são conseqüências do processo de formação e secagem, são também consideradas por nós, responsáveis pelas flutuações no campo de deformação da amostra sob condições de tensionamento. A figura 16 mostra a distribuição de deformações axiais e laterais quando as amostras são tensionadas ao longo do teste. Os valores foram calculados de acordo com o organograma de símbolos da figura 12 e discutido no item 6. Devido à grande quantidade de dados, os valores das deformações são mostrados apenas para algumas modalidades de deformações e estágios do teste. Entretanto, baseado em nossas observações, estes resultados exemplificam os vários estágios de tensionamento ao longo do teste.

Modificações no perfil de distribuição das deformações axiais e laterais ocorreram ao longo do tracionamento das amostras para todos os papéis testados. Isto

pode ser observado comparando o perfil de distribuição de deformação em um estágio inicial do teste, com aquele obtido em um estágio mais avançado do teste. Em outras palavras, as flutuações no campo de deformações da folha podem ocorrer ao acaso, alternando e alterando em valores e em tendências durante o processo de tensionamento. Uma possível explicação para o fenômeno é que, com o tensionamento, há um aumento do potencial de propagação de forças através da estrutura da folha, via ligações fibrilares e cada local ou região específica na folha responderá e transferirá essas forças de acordo com suas próprias características estruturais intrínsecas, localizadas na rede de fibras. Portanto, uma específica região com grande deformação no início do tensionamento pode, não necessariamente, sofrer a maior deformação em estágios mais avançados do tensionamento. Isto pode ser observado comparando a figura 16A com a 16B. Na 16A pode ser observado que, em um estágio inicial de teste, uma região na folha de relativamente alta deformação (1E, 2E, 3E, 4E, 5E) ocorreu na direção ao longo da largura da amostra e que, nas demais regiões da matriz, o campo de deformação se mostrou menos pronunciado. Este perfil de distribuição de deformação se alterou com o decorrer do teste e, em mais alto nível de tensionamento (figura 16B), altas deformações ocorreram na região (1D, 2D, 3D, 4D, 5D) e em diferentes locais no campo da matriz, aleatoriamente.

As figuras 16C e 16D mostram que as deformações laterais para uma mesma amostra são, em geral, de menores valores e com distribuição mais uniforme, ao longo do teste, do que as deformações no plano longitudinal da amostra, para um mesmo nível de deformação axial nominal aplicada. De acordo com

a convenção de sinais, positivo é para tração e negativo para compressão, quase todos os sinais foram negativos, como se poderia esperar para as deformações laterais da folha, sujeita a alto nível de tensão (figura 16D). No entanto, deformações positivas apareceram ao longo da largura da amostra (4B, 3D, 4F, 4G na figura 16C) mesmo a um nível de 1,29% de deformação axial nominal aplicada. Tal fenômeno também foi observado para as deformações axiais, ou seja, deformações negativas apareceram nas regiões (5F, 3F, 1F na figura 16A) indicando que, mesmo sob condições de tracionamento, os papéis do tipo *tissues* podem apresentar regiões que sofrem deformações de compressões.

Assim, a técnica matricial de pontos, além de nos permitir determinar um perfil de deformações, por região e/ou de um específico local, no plano da folha, também nos permite monitorar suas distribuições ao longo da curva tensão-deformação. Variações locais, as quais poderiam resultar do efeito do ação do procedimento de crepagem, em papéis tipo *tissues*, fabricados industrialmente, ou por outros efeitos, relacionados ao processo de formação e/ou secagem, anteriormente mencionados, podem ser analisados.

Como sabemos, as relações de contrações laterais são úteis para se conhecer a capacidade dos papéis em contrair lateralmente, quando uma tensão é aplicada axialmente no plano da folha. Portanto, tendências de variações nas relações de contrações laterais *versus* deformações axiais no decorrer do teste de tração, para cada amostra, foram determinadas. Porém, também devido à grande quantidade de dados, apenas alguns gráficos bidimensionais são apresentados na figura 17, os quais representam valores médios obtidos de cinco amostras. Ao

contrário do que se esperava, as relações de contrações laterais apresentaram alterações significativas com o decorrer do tensionamento da folha. Estas alterações dependem do tipo de *tissue* estudado (com alto ou moderado grau de orientação das fibras e folhas confeccionadas em laboratório) e do plano de simetria de orientação de fabricação, ou seja, MD e CD. Diferenças observadas nos comportamentos dos papéis foram provavelmente causadas pelo efeito da ação de crepagem, o qual parece ser mais pronunciado para os papéis com mais alto grau de orientação de fibras (figura 17A) e que para o papel com menor grau de orientação de fibras (figura 17B), as relações de contrações laterais permaneceram relativamente constante, embora um pequeno aumento ainda foi observado com o decorrer do tensionamento da

folha. As folhas laboratoriais (figura 17C) mostraram o comportamento diferente dos papéis industriais e se contraíram mais acentuadamente no início do tensionamento, com tendências à estabilização em níveis mais elevados de tensionamento, ou seja, no final do teste. Entretanto, os valores iniciais das relações de contrações laterais são valores obtidos de divisões de deformações laterais/axiais no início do tensionamento, portanto, muito pequenas e podem ter significado técnico comprometedor, devido a possíveis variações experimentais da metodologia.

Conclusões

Neste trabalho, apresentamos as teorias e algumas aplicações da técnica matricial de pontos para determinações de propriedades mecânicas de papéis de bai-

xa gramatura e/ou baixa intensidade de ligações interfibras, tais como *tissues*. Como sabemos, não é simples obter de um único método experimental relações das tensões-deformações, análises de deformações em um plano bidimensional e relações de contrações laterais, todos em uma mesma amostra e ao longo do teste de tração onde melhor convier com as necessidades do pesquisador. Acreditamos que os dados apresentados demonstram a versatilidade do método como uma técnica metrológica. Entretanto, como qualquer método experimental novo, existem limitações: o sistema semi-manual (mesa digitalizadora), utilizada para computadorizar os dados, é lenta e de certa forma tediosa. As revelações dos filmes fotográficos e outras manipulações também contribuem para um atraso entre a realização do teste e a

Figura 16: Distribuição de deformações para os *tissues* fabricados industrialmente com alto grau de orientação de fibras e testados na direção de fabricação MD

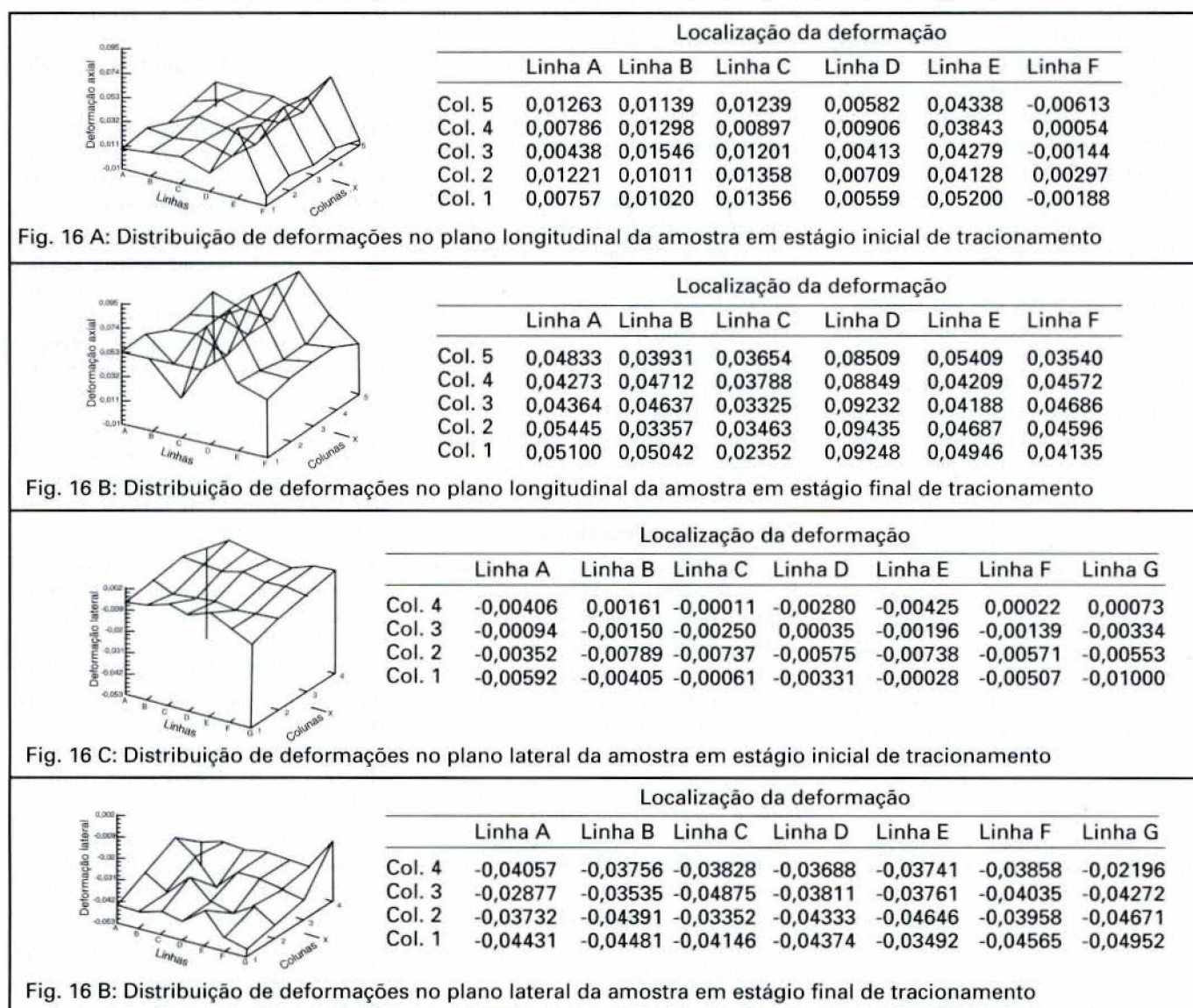
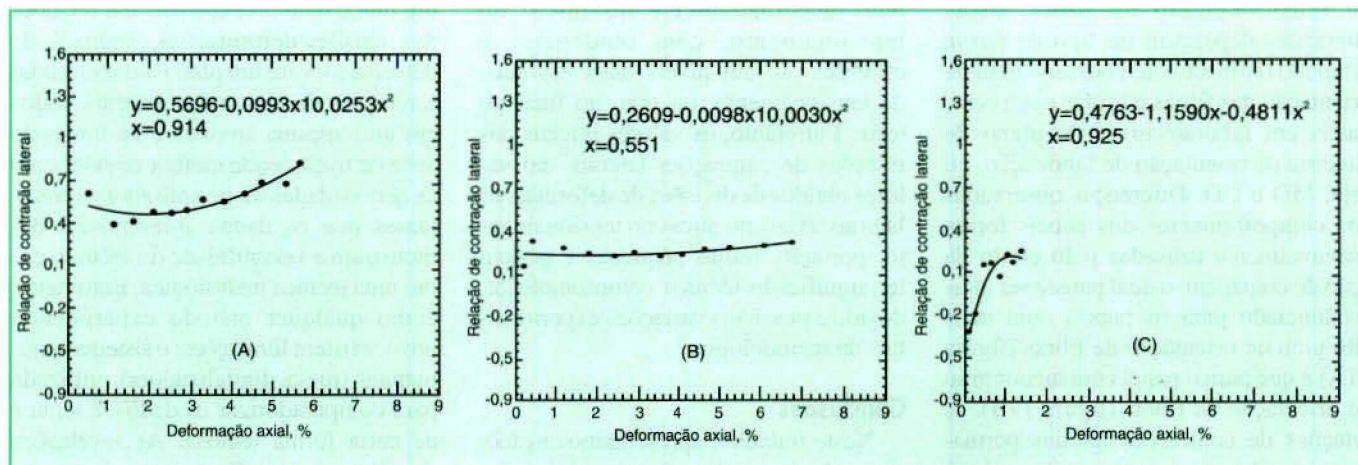


Figura 17: Relações de contrações laterais versus deformações axiais. (A) direção MD com alto grau de orientação de fibras. (B) direção MD com moderado grau de orientação de fibras (C) folhas laboratoriais



obtenção de resultados. Na realidade, o método requer um sistema digital e programável de análises de imagem para ser atualizado. O progresso alcançado na fabricação de sensores eletrônicos de imagens têm sido significativo e, hoje, os sistemas eletrônicos de imagens de alta resolução se aproxima à qualidade da imagem dos filmes fotográficos. Logo, estamos esperando por esta oportunidade como um próximo passo para melhorar o sistema de aquisição de dados da técnica matricial de pontos.

As principais vantagens da técnica são:

a) suas aplicações não são restritas à ciência de papéis e pode ser utilizada para plásticos, filmes, laminados de pequena espessura e outros materiais foliados;

b) em uma mesma amostra, informações detalhadas de deformações podem ser obtidas ao longo do teste tensão-deformação;

c) não há severas restrições para o tamanho da matriz de pontos a ser utilizada. O sistema é flexível e permite a utilização de diferentes tamanhos de unidades básicas de processamento, as quais, por sua vez, permite diferentes combinações para processar diferentes regiões na amostra, cobrindo desde pequenas áreas milimétricas a áreas mais pronunciadas e podendo ser adaptada de acordo com as necessidades do pesquisador;

d) o método permite a utilização de diferentes tamanhos de corpos de prova, facilitando a manipulação e a utilização de corpos de prova em equipamentos convencionais de teste de laboratório;

e) o potencial, versatilidade e simples operação do *software* permite que o mes-

mo seja utilizado por técnicos com pouco ou nenhum conhecimento anterior em computação;

f) o método pode ainda ser aplicado para outros tipos de estudos, tais como: determinação de deformações com aplicação de forças no plano biaxial da amostra;

g) determinação de deformação em papéis úmidos e/ou com diferentes teores de umidade;

h) a técnica permite, em combinação com outros métodos, estudos de correlações com os parâmetros estruturais de formação responsáveis por flutuações nas propriedades dos papéis, tais como: correlação com a distribuição de massa na folha formada, ou seja, com a distribuição de gramatura, com a orientação locais de fibras, com as variações de espessuras, correlações com tamanho, orientação e distribuição de flocos etc.

Referências bibliográficas

Seo, Y. B.; Chaves de Oliveira, R & Mark, R. E. *Tension buckling behavior of paper*. *Journal of Pulp and paper Science*, Vol 18 (2) J55-J59 march 1992.

Missteat, C. & Scott-Harman, H. *The advanced air-brush book*. New York, Van Nostrand Reinhold, 1984, 160 p.

Chaves de Oliveira, R. *Stress - strain behavior of low grammage and/or lightly bonded papers by dot matrix technique*. Ph.D. Thesis, *Suny College of Environmental Science and Forestry*, Syracuse, NY, 1993, 271p.

Jenkins, F. A. & White, E. *Thin lenses*. In: *Fundamental of optics*. 2nd ed., New York, McGraw-Hill, 1950. Chapter 3, -36-50.

Franke, G. *A perfect image formation*. In: *Physical optics in photography*. London, The Focal press, 1966, p-11-63.

Hecht, E. & Zajac, A. *Geometrical optics-paraxial theory*. In: *Optics*. Reading, Mass. Addison-Wesley, 1976, p.990166.

Beer, F.P. & Johnston, E.R. *Transformation of stress and strain*. In: *Mechanics of materials*. New York, McGraw-Hill, 1981. Chapter 6.

Perkins, R. W. *Models for describing the elastic, viscoelastic and inelastic mechanical behavior of paper and board*. In: Mark, Richard E. (ed.) *Handbook of physical and mechanical testing of paper and paperboard*. New York, M Decker, 1983, Vol. 1, Chapter 2, -23-75.

Mark, R. E. *Structural anisotropy*. In: Mark, Richard E. (ed.) *Handbook of physical and mechanical testing of paper and paper board*. New York, M. Decker, 1984, Vol. 2, Chapter 24, p283-377.

Norman, B. *Overview of the physics of forming. paper presented at the fundamentals of papermaking; ninth Fundamental Research Symposium*, Cambridge, Engl., 17-22 Sept. 1989, 70p.

Haglund, I. Norman, B. & Wahren, D. *Mass distribution in random sheets - Theoretical evaluation and comparison with real sheets*. *Svensk papperstidning* 77(10): 362-70, 1974.

Bristow, J.A. & Kolseth, P. (eds.) *Paper structure and properties*. *International Science and Technology Series*, 8. New York, Marcel Dekker, 1986, 360 p.

Rance, H. F. (ed.) *The structure and physical properties of paper*. Amsterdam, Elsevier, 1982, Vol. 2, 288 p ▲