

Mecanismo de rompimento em papel jornal submetido a esforço cíclico e retardamento de trincas por impregnação de polímero como obstáculo

Failure mechanism in newsprint subjected to cyclic loading and crack retardation by impregnated polymer obstacle

Autores: Sami İMAMOĞLU[□], Arif KARADEMİR[†], Cecil ATİK[‡], Gladys MOGOLLON[§]

Palavras-Chave: propagação e retardamento de fratura; carga cíclica; limite da fadiga; trama de fibras, direção de máquina e direção transversal; papel jornal; polímero-barreira.

RESUMO

Se considerado como questão de engenharia, o retardamento da propagação de uma fratura ou trinca é um dos temas mais importantes de pesquisa. Durante a utilização final do papel jornal, tal como sua impressão em alta velocidade, a folha de papel está inevitavelmente sujeita a quebras, devido à iniciação e propagação de micro e macro trincas. Ainda, os testes-padrão de resistência do papel não fornecem muita informação quanto às propriedades no uso final e desempenho da folha durante conversão. Este trabalho apresenta estudo de predição das respostas do limite de vida em fadiga nos sentidos máquina e transversal de amostras de papel jornal quando sob esforço cíclico e os efeitos da impregnação de um polímero na fratura do papel. Foi elaborado um método específico para a impregnação de polímero em amostras de pa-

ABSTRACT

From an engineering viewpoint, the retardation of a propagating crack is one of the most important research subjects. During the end use of newsprint such as high speed printing converting, paper web is inevitably subjected to failure as a consequence of the micro and macro crack initiation and propagation. Standard strengths of paper tests however do not provide much information about end use properties like paper web runnability. This paper presents a study on the prediction of the fatigue-life responds of cross and machine direction of newsprint samples under cyclic loading and the effects of polymer impregnation on the fracture of paper. A specific method of polymer impregnation into paper samples was carried out. Both unimpregnated and polymer-impregnated samples were subjected to monotonic and cycling loading tests as well as some other basic tests. An empirical equation for the fatigue-life responds of paper samples tested was developed. On the load versus number of cycles curve, simulated and experimentally obtained data was found to be in a good agreement. Overall, the equation developed proved to be a good way of predicting the fatigue life of the paper materials subjected to variable loads. Scanning electron microscopy and photos taken from crack line during testing revealed that the polymer region on the fracture of paper was quite effective in retarding and deflecting the crack propagation from its initial direction and the effect of fibre on the fatigue behaviour and crack retardation was crucial.

Key words: crack propagation and retardation; cyclic loading; fatigue limit; fibre network; machine and cross direction; newsprint; polymer obstacle.

Referência:

[□] Faculty of Forestry, Artvin, Turquia - [†] Faculty of Forestry, Kahramanmaras, Turquia
[‡] Faculty of Forestry, Istanbul, Turquia. [§] Faculty of Forestry, Mérida, Venezuela.

pel. Ambas as amostras de papel não-impregnadas e impregnadas com polímero foram submetidas a testes de esforços monotônicos e cíclicos e a alguns outros testes básicos. Foi desenvolvida uma equação empírica para resposta do limite da vida em fadiga das amostras de papel testadas. Na curva da carga *versus* número de ciclos, foi encontrada boa concordância entre dados simulados e dados encontrados experimentalmente. No geral, a equação desenvolvida mostrou ser meio adequado para a predição da vida em fadiga dos materiais de papel submetidos a forças variáveis. Microscopia eletrônica de varredura e fotografias da linha da fratura feitas durante a experiência revelaram que a presença de polímero na região da fratura no papel foi realmente efetiva no retardamento e na derivação da propagação da fratura de seu curso inicial, e que o efeito da orientação das fibras no comportamento da fadiga e no retardamento da fratura é crucial

INTRODUÇÃO

O papel tornou-se um produto indispensável no mundo atual, muito depois de sua introdução nos hábitos do homem. Trata-se de um material composto, consistindo de um número variado de ingredientes de origens diversas e com diferentes morfologias. Se consideramos o papel sem aditivos ou carga mineral, suas características mecânicas dependerão grandemente das propriedades físicas das fibras e do arranjo destas fibras na estrutura da folha. Em uma folha de papel, o grau de ligação entre as fibras depende das naturezas química e física da superfície da fibra e de como as fibras têm sido distribuídas nesta folha de papel.

Quando é provocado o alongamento de uma folha de papel partindo-se de zero, irão acontecer fraturas microscópicas ou submicroscópicas. Estas fraturas podem envolver a estrutura interna de fibras, resultando em pequenas elongações permanentes, enquanto que somente poucos segmentos da fibra falham completamente. Niskanen concluiu [1] que o rompimento da fibra é o fator crítico na resistência do papel so-

mente se as ligações forem muito fortes. A grande-escala da estrutura da folha rege os caminhos da fratura macroscópica, e a pequena-escala da estrutura governa as fraturas microscópicas. Está claro que colapsos de ligações têm participação importante na resposta do papel a solicitação externa. O comportamento pré-ruptura do papel é governado pelas propriedades mecânicas heterogêneas e o arranjo casual das fibras e ligações [1].

No papel, o comportamento da quebra é um parâmetro mecânico fundamental, muito importante na fabricação, impressão ou outras operações de conversão, pois que quebras da folha de papel decorrentes de insuficiente resistência à ruptura são causa de importantes perdas financeiras para a indústria. Estudos do desempenho do papel têm mostrado que a maioria das quebras da folha se origina de defeitos intrínsecos, tais como feixes de fibras, furos e fatores semelhantes na própria folha de papel [2].

Durante a fabricação do papel e em outras operações de conversão, a maioria das solicitações, ou forças, é aplicada no plano da folha [3]. Técnicas de testes de fadiga no-plano podem ser considerados como alternativa aos testes fora-do-plano da folha e a outros testes de resistência.

A fadiga, em essência, é a progressiva, localizada e permanente mudança estrutural que acontece em materiais sujeitos a cargas e deformações repetidas, e que pode resultar em quebra ou fratura depois de um número suficiente de ciclos [4]. Quebras por fadiga são causadas pela ação simultânea da repetição de cargas, solicitação de tração e deformação plástica. Na ausência de qualquer uma destas três condições, a quebra por fadiga não irá se iniciar nem propagar. A carga cíclica dá início à trinca; e a solicitação de tração provoca o crescimento (propagação) da trinca.

As falhas por fadiga iniciam e se propagam em região onde a deformação é mais severa. Devido ao fato de a maioria dos materiais de engenharia, e também os tecidos fibrosos, contêm defeitos, e portanto áreas de con-

centração de tensões que intensificam a deformação, a maioria das falhas por fadiga se iniciam e aumentam a partir de defeitos estruturais. Sob a ação de carga cíclica ocorre a formação de uma zona plástica na extremidade do defeito. Esta zona de alta deformação converte-se então em sítio de iniciação de uma ruptura por fadiga.

O estudo mais importante em medição de propriedades mecânicas da fibra celulósica individual sob esforços monotônicos e cíclicos foi publicado em uma série de trabalhos, com correspondente informação dos detalhes pertinentes à técnica de medição [5, 6, 7, 8].

Na perspectiva da engenharia, a interrupção da propagação de uma trinca é dos mais importantes temas de pesquisa, e seriam muitos os procedimentos para bloquear ou interromper o aumento de uma trinca. O conceito de interrupção de fratura por fadiga desenvolvido ao longo dos anos inclui: deflexão da linha da trinca; interligação-em-ponte das trincas e selagem ou blindagem da trinca. Os mecanismos de interrupção e de retardamento de uma trinca fundamentam-se na contenção ou na deflexão de uma trinca em crescimento mediante a utilização de obstáculos eficazes [9]. Em tal mecanismo, uma trinca pode começar a se desenvolver, mas pode por sua vez ser contida ou retardada por via de um retardador. Partículas de elastômeros como retardantes são capazes de parar o crescimento de trincas, e com isso evitar que a maioria delas venha a ser causa de rompimentos muito prejudiciais. O desenvolvimento de muitas fissuras em material quebradiço absorve importante quantidade de energia na frente da trinca em propagação. Se a tensão externa for aumentada, uma trinca poderá se iniciar em local da amostra inteiramente diferente [10]. Em papel normal há geralmente fibras atrás da extremidade da trinca que se estendem através da fissura e que mantêm o tecido unido. No que se refere à resistência ao rasgo, tem sido demonstrado que com a propagação da trinca através da folha uma parcela importante das fibras

que cruzam a linha de fratura [11] são quebradas. Com isso, para a resistência ao rasgo, ou à fratura, a robustez da fibra é propriedade muito mais importante do que para efeito de resistência à tração do papel [12].

Neste estudo, como obstáculo retardador de trincas foi aplicado polímero de poliestireno à superfície do papel por meio da prensa de colagem. Os fabricantes de papel dispõem, em essência, de duas escolhas básicas para a obtenção de reforço do papel mediante polímeros, a sua adição na parte úmida ou o revestimento na prensa de colagem ou coater. De uma perspectiva científica, destas duas estratégias podem ser esperados resultados diferentes. Polímeros - tais como amidos catiônicos -, quando adicionados na parte úmida tendem a ser adsorvidos em todas as superfícies disponíveis da fibra antes da formação da folha. Deste modo as ligações fibra-fibra acontecem entre superfícies recobertas com polímero. Diferentemente, a aplicação de polímeros na prensa de colagem ou coater é essencialmente uma operação de impregnação, onde a solução permeia em papel já formado [13].

O objetivo deste trabalho tem sido observar o desempenho do obstáculo representado pelo polímero dentro da trama fibrosa do papel, e compreender o efeito da orientação das fibras no retardamento de trinca iniciada e o mecanismo de sua propagação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa foram utilizados os materiais indicados na seqüência. O polímero aplicado foi o poliestireno, recebido da Aldrich Chemical Co., em forma de grânulos. Papel jornal não impresso foi recebido da Aylesford Newsprint Ltd. (Kent, UK), na forma de bobina. No trabalho que expomos a continuação, as amostras de papel foram identificadas como sendo de direção de máquina (MD) ou de direção transversal (CD). Esta identificação quer indicar que as amostras foram cortadas de modo a indicar o sentido em que foram aplicadas as forças cíclicas e outras. As amostras foram climatizadas a $23 \pm 1,0$ °C e a $50\% \pm$

2,0% de UR, e todos os testes foram realizados em condições idênticas.

As amostras acondicionadas de papel jornal tiveram testadas, com utilização de métodos padrão TAPPI e ISO, as propriedades de: gramatura, espessura, densidade aparente, alvura, opacidade, aspereza PPS, permeância ao ar, teste modificado de absorção de óleo (utilização de solução de polímero ao invés de óleo) com emprego de aparelho Bristow Absorption Tester ajustado para velocidade de 0,3 cm/s.

Os grânulos de polietileno foram dissolvidos em tolueno sob agitação constante, na proporção de 15 g em 100 mL, e utilizados dentro de dois dias da preparação. A solução foi aplicada como elemento-obstáculo nas amostras de papel sobre molde especial e com a utilização de um coater em escala de laboratório K-Koater, acionado por motor elétrico. O molde foi construído em plástico de acetato por se demonstrar o material mais apropriado. Para a feitura dos furos de 6 mm de diâmetro foi utilizado um

vazador de aço, sendo deixada distância de 4 mm entre furos.

A resistência à tração do papel-base (amostras não impregnadas) e de amostras de papel impregnado foi medida com aparelho Instron 1122, de sensibilidade suficiente para permitir cálculos de alongamento, de absorção de energia sob tensão (TEA) e do módulo de Young, diretamente dos dados da resistência à tração. E mais, foram também feitos testes de resistência a dobras e da resistência da coesão interna conforme métodos padrão apropriados da TAPPI.

Quanto ao teste de fadiga, a forma e dimensões dos corpos de prova para os testes deste trabalho são mostradas na Figura 1. As amostras foram cortadas de tal modo que a distância entre as garras do aparelho Instron podia ser ajustada em 100 mm, sendo a sua largura de 25 mm. No centro do corpo de prova foi feito um entalhe nítido, de 4 x 4 mm, por meio de um gabarito de corte composto de um par de lâminas afiadas, uma das quais regulável para

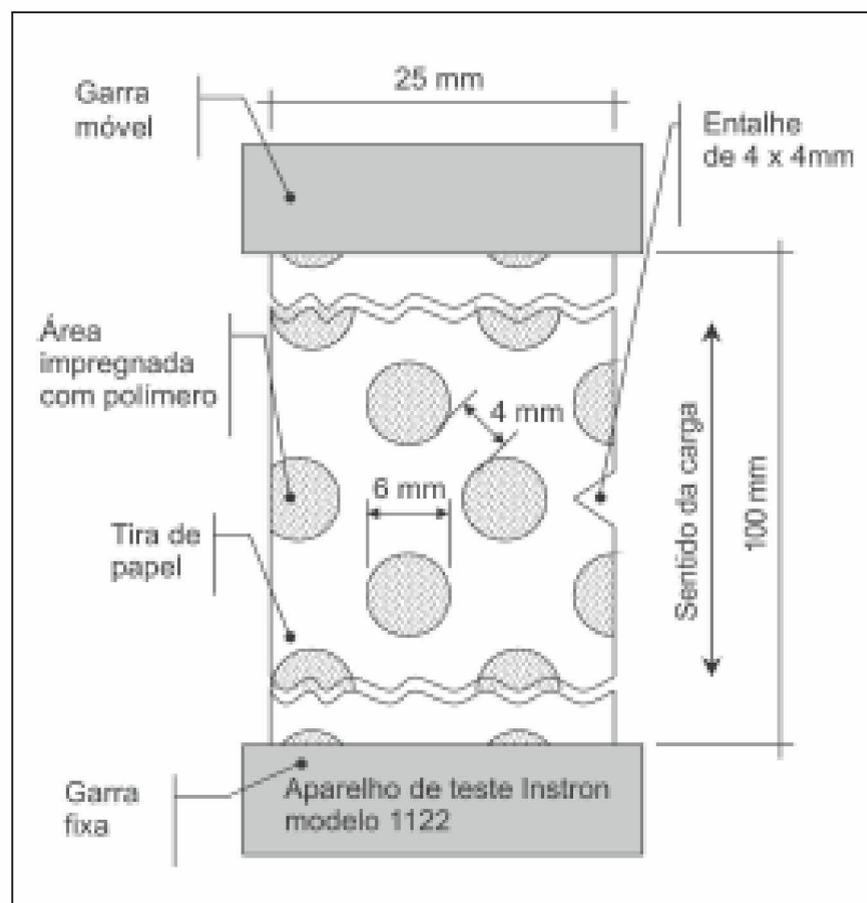


Figura 1. Dimensões e configuração dos corpos de prova para testes no aparelho Instron 1122.

possibilitar os ajustes dimensionais necessários. As amostras eram submetidas a cargas por meio de um par de garras especialmente desenhadas e montadas no aparelho de teste Instron universal modelo 1122. A velocidade do aparelho foi ajustada em 20 mm/minuto. Depois de realizados testes de tração e cíclicos preliminares em cada tipo de amostra, foi determinada a carga máxima de ruptura das amostras de papel e também deduzida alguma estimativa quanto ao comportamento sob fadiga e dos efeitos da frequência. As cargas máximas de ruptura para cada amostra foram então reduzidas gradualmente e aplicadas em ação cíclica constante. Foram repetidos pelo menos 5 ensaios para cada aplicação de carga. Em cada ensaio foram registradas as forças em Newton (N) aplicadas experimentalmente e o número de ciclos completos. Para análises ulteriores, foi utilizada uma câmara de vídeo para observação do início da trinca, da sua propagação e desvio durante o ciclo. Além disso, foi utilizada microscopia eletrônica de varredura (SEM) para os exames da trajetória da trinca em alguns corpos de prova não-impregnados e impregnados com polímero, e da interação do polímero e fibra na região da ruptura. Amostras submetidas a microscopia foram examinadas em várias regiões e efetuados registros fotomicrográficos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características gerais e de resistência

Foram medidas as características gerais do papel jornal (NP) utilizado como papel-base neste estudo. Os resultados obtidos são indicados na Tabela 1. A impregnação com polímero aumentou a gramatura e a espessura do NP-base em 3 g/m² e 2 μm, respectivamente. Em outras palavras, a impregnação com polímero aumentou a gramatura em 6,8% e a espessura em 2,9%. Estes dados permitem afirmar que a maior parte do polímero foi depositada entre as fibras componentes o tecido da folha. Como consequência das alterações em gramatura e espessura, enquanto a densidade da folha

Propriedade	NP (papel jornal) não-impregnado	NP (papel jornal) Impregnado com polímero
Gramatura, g/m ²	44	47
Espessura, μm	67	69
Densidade da folha, kg/m ³	650	679
Volume (<i>bulk</i>), cm ³ /g	1,54	1,47
Opacidade, %	93,5	-
Alvura ISO, %	63,5	-
Aspereza PPS, μm	4,2	-
Absorção de óleo, cm ³ /m ²	132	-

Tabela 1. Características gerais do papel jornal (NP) utilizado como papel-base neste estudo.

resultou aumentada, o volume (*bulk*) do papel teve redução.

Os resultados dos testes físicos nas amostras de papel jornal não-impregnado e impregnado com polímero, nos dois sentidos de máquina - longitudinal (MD) e transversal (CD) -, correspondentes a resistências a tração, rasgo, tração *zero-span* e dobras duplas, são tabulados na Tabela 2.

É recorrente a colocação de que as resistências à tração e ao arrebentamento aumentam com o aumentar da resistência das ligações entre fibras. A resistência ao rasgo, contudo, requer um certo mínimo de força de ligação, depois do que o aumento das forças de ligação entre fibras reduz esta resistência [14]. A resistência a dobras tam-

bém aumenta com o aumentar da ligação, mas volta a diminuir quando a ligação das fibras for tão forte que faça o papel frágil, quebradiço. Tanto a resistência ao rasgo como a resistência a dobras aumentam com fibras mais longas e são mesmo muito sensíveis ao comprimento da fibra, assim como a seu grau de ligação.

Com utilização do aparelho de testes Instron Modelo 1122, foram monitorados os efeitos da impregnação com polímero na fratura do papel quando sob carga monotônica. Foram considerados os resultados da resistência à tração, carga máxima de ruptura, absorção de energia sob tração (TEA) e do módulo de Young obtidos das amostras de papel jornal em exame.

Propriedades do Papel	Papel jornal-MD		Papel jornal-CD	
	Não impregnado	Impregnado com polímero	Não impregnado	Impregnado com polímero
Carga máxima de ruptura, N	31,27	34,54	9,13	9,42
Índice de tração, Nm/g	47,36	49,00	13,83	13,51
Alongamento, %	0,85	0,74	2,64	1,61
Índice de rasgo, mN•m ² /g	11,30	11,38	8,05	8,38
Resistência a dobras, n° Log ₁₀	2,80	3,06	1,22	1,82
Índice TEA, mJ/g	267,00	224,00	229,00	131,00
Módulo de Young, MPa	4068,00	4124,00	617,00	736,00
Índice <i>Zero-span</i> , Nm/g	43,03	-	16,97	-

Tabela 2. Algumas propriedades físicas de papel jornal não-impregnado e impregnado com polímero, para amostras em ambos sentidos de máquina, MD e CD.

O polímero aumentou a capacidade de carga máxima de ruptura do papel jornal em 10,45% na direção máquina e em 3,17% na direção transversal. A orientação das fibras no tecido componente a folha foi um dos fatores mais importantes a influir na resistência à tração. Para ambas as direções do papel o polímero-obstáculo produziu efeito nas fibras, fazendo com que se ligassem mas fortemente e não permitiu que se rompessem.

Os resultados obtidos permitem deduzir que a impregnação com polímero reduziu a extensibilidade em ambas as direções de máquina. O alongamento é a distorção que o papel sofre quando sob esforços de tração. É normalmente medido no aparelho de teste de tração ao mesmo tempo em que é medida a própria resistência à tração. Resumindo, pode-se afirmar que a impregnação com polímero firma as fibras e não permite que sejam arrancadas. Portanto, a impregnação com polímero reduz a extensibilidade.

A Absorção de Energia sob Tração (TEA) é referência muito importante da resistência do papel. A grandeza da TEA é representada pela área que se forma sob a curva tensão-deformação, conforme medido pelo aparelho de teste de tração, e como tal fornece indicação da robustez de uma peça de papel frente a possibilidades de fraturas. Em papel de baixa elongação poderá se iniciar com mais facilidade algum rompimento em função do grande esforço que irá se concentrar em uma área pequena. Contudo, se o papel possuir alto grau de extensibilidade, o alongamento será distribuído sobre uma área muito mais ampla e a ruptura não deverá se iniciar. À luz deste conhecimento, os dados da Tabela 2 demonstram claramente que a impregnação com polímero-obstáculo reduziu a extensibilidade do papel e, a depender disso, o índice de absorção de energia sob tração resulta diminuído em ambas as direções de máquina da folha, longitudinal e transversal.

Foi comprovado que a impregnação com polímero aumentou o módulo de Young das amostras de papel.

Quanto mais alto o módulo de Young maior será a rigidez; dado que o módulo de Young é numericamente equivalente à tensão-deformação por unidade de área, é obtida maior rigidez mediante a redução da deformação sob determinada intensidade de carga.

O teste de resistência a dobras duplas é uma boa indicação da estrutura e da formação do papel. Como os resultados indicam, há diferença considerável em resistência a dobras entre amostras impregnadas com polímero e não-impregnadas. A impregnação com polímero favoreceu a ligação dada sua capacidade de ativar a interação fibra-fibra. Ainda, quando a amostra é submetida à ação de dobradura a temperatura da área envolvida aumenta mais que a temperatura do ar, o que causa alguma perda de umidade do papel e com isso uma notável perda em resistência a dobras. Se nesta área específica houver polímero-obstáculo impregnado, o polímero torna-se mais macio com temperatura maior e irá manter forte ligação das fibras. Mais ainda, o polímero irá manter as fibras unidas não permitindo que se soltem.

Quanto à resistência ao rasgo, a impregnação de polímero teve efeito positivo em todas as amostras. Dos resultados pode ser entendido que a

impregnação favorece a união das fibras e que melhora as propriedades individuais da fibra. Mais ainda, quando as amostras são submetidas a teste de rasgo, o rasgamento prossegue em linha reta. Se o rompimento tender para o cruzamento da região com polímero, a linha reta inicial será desviada para outra direção pela região impregnada com polímero, isto originando importante aumento no comprimento do rasgamento e de resistência ao rasgo.

Mecanismos de propagação e retardamento da trinca sob carga cíclica

Fraturas por fadiga são causadas pela ação simultânea de esforço cíclico, tensão de tração e deformação plástica. Fadiga é a alteração estrutural progressiva, localizada e permanente que ocorre em materiais sujeitos a flutuações de tensões e deformações que podem resultar em trincas ou fraturas depois de um número suficiente de oscilações.

A quebra por fadiga de uma fibra isoladamente pode ser caracterizada por três estágios distintos [15]:

- o estágio da iniciação,
- seguido da propagação de microtrincas,
- e então o estágio de macro propagação; inclusive os modos transitórios que o ligam.

Papel jornal direção máquina				Papel jornal direção transversal			
Não impregnado		Impregnado com polímero		Não impregnado		Impregnado com polímero	
Força (N)	Número de ciclos	Força (N)	Número de ciclos	Força (N)	Número de ciclos	Força (N)	Número de ciclos
28,25	1	28,50	3	9,80	2	10,00	5
27,50	9	28,25	21	9,50	7	9,75	36
26,25	15	27,50	93	9,25	29	9,50	164
25,00	45	26,25	126	9,00	60	9,25	236
23,75	119	25,00	215	8,75	138	9,00	354
22,25	376	23,50	655	8,50	250	8,75	441
21,25	765	22,25	1200	8,25	1836	8,50	1160
20,60	1200	21,25	1850	8,00	2762	8,25	3733
20,00	4256	20,50	7596	7,95	5605	8,10	7250
18,75	13750	20,00	13847	7,90	14235	7,80	21000

Tabela 3. Forças (Newton) aplicadas experimentalmente e número de ciclos completados em cada amostra.

Estudo sobre fadiga em papel requer um grande número de ensaios devido a sua estrutura heterogênea e composta. Fadiga em materiais compostos com fibras de reforço é fenômeno bastante complexo, e o comportamento da fadiga destes materiais heterogêneos é fundamentalmente diferente do comportamento exibido por metais [16].

Neste estudo, para cada amostra foram registrados as forças em Newton aplicadas experimentalmente e o número de ciclos completados, conforme exposto na Tabela 3. Estes dados foram então alimentados a um programa de computador [17] baseado em técnicas de regressão polinomial dos mínimos quadrados. Com a utilização deste programa especial foi determinada uma equação matemática característica para limite de fadiga (A) e constantes empíricas (B, D) de cada espécime de tecido fibroso, impregnado com polímero ou de outra forma. Mediante aplicação desta equação foi calculada uma faixa de cargas de fadiga (dados de simulação) até ser alcançado o limite de fadiga (de 1 a 100.000 ciclos). Foram elaboradas curvas com dados constituídos pelos valores experimentais e simulados de cada amostra, ou seja, forças aplicadas *versus* número de ciclos. A abscissa indica o número de ciclos (escala logarítmica), enquanto o eixo da ordenada registra a força (Newton) medida pelo aparelho Instron durante estes testes de fadiga.

A equação matemática característica para tecidos fibrosos e tecidos fibrosos impregnados com polímero é dada como:

$$S = A + [B / (N + D)] \text{ onde,}$$

S = Força, (N)

N = Vida em fadiga, (número de ciclos)

A = Limite de fadiga, (N)

B, D = Constantes empíricas dos materiais indicadas na Tabela 4.

O número de ciclos de carga a que um material pode resistir antes da ruptura aumenta conforme diminua a carga. Abaixo desta carga limite, definida como limite de fadiga ou limite de

Materiais	Limite de fadiga (N)	Constantes empíricas dos materiais	
	A	B	D
Papel jornal – MD (não impregnado)	19,53	1074,24	131,12
Papel jornal – MD (impregnado com polímero)	19,91	3053,85	340,86
Papel jornal – CD (não impregnado)	7,96	155,71	83,88
Papel jornal – CD (impregnado com polímero)	7,85	899,63	413,76

Tabela 4. Limites de fadiga e constantes empíricas dos materiais para amostras de papel jornal impregnadas e não-impregnadas.

resistência, o material pode resistir a um número infinito de ciclos sem rompimento. Regra geral, as propriedades de fadiga são muito sensíveis às condições do material. Exceção feita para casos especiais onde estão envolvidos defeitos internos ou de tempera, todas as trincas por fadiga se iniciam na margem da amostra.

As Figuras 2 e 3 mostram um histórico típico de carga-ciclo para corpos de prova direção máquina e direção transversal de papel jornal não impregnado e impregnado com polímero. Dados relativos a valores simulados e experimentais são plotados nas mesmas figuras. Existe boa concordância entre os dados experimentais e a simulação teórica, o que comprova que o princípio de avaria enunciado é capaz de simular o tipo de comportamento da degradação que tem sido observada nos espécimes de papel jornal.

A Figura 2 indica a grandeza das cargas dos ciclos das amostras de papel jornal direção MD, não-impregnadas e impregnadas com polímero. Nota-se claramente que as duas amostras tiveram desempenho semelhante e as diferenças entre elas são mínimas, ou seja, menores que 1 N. O fator representativo é que para ambas as amostras a carga diminui notavelmente com o número de ciclos até atingir o limite de resistência.

O comportamento sob fadiga do papel jornal direção CD é mostrado na Figura 3. Valerá dizer que a grandeza das cargas do ciclo é significativamente influenciada pela orientação das fibras. Como previsto, a resistên-

cia à fadiga do papel jornal direção CD é menor que a do papel direção MD em função da citada orientação das fibras. É conhecido que em papel jornal direção CD, o sentido de iniciação da trinca coincide com o sentido de orientação das fibras. O mecanismo de retardamento melhora as propriedades de fadiga até certo ponto (próximo do limite da fadiga) para, então, se constatar que o comportamento sob fadiga do papel não-impregnado é superior ao do papel impregnado com polímero.

Os dados apresentados nas Figuras 2 e 3 expõem alguns aspectos importantes. Primeiro, um limite de fadiga é evidente, ou seja, abaixo de certa carga cíclica não deverão ocorrer falhas por fadiga por um arbitrariamente grande número de ciclos. Segundo, a grandeza das cargas dos ciclos das amostras não-impregnadas situa-se sempre abaixo da grandeza das cargas das amostras impregnadas com polímero. Por fim, diferentes tipos de amostras de papel exibem vários modos de comportamento da fadiga. E mais, a resistência à tração é um fator representativo a influenciar o comportamento da fadiga. Se forem comparados resistência à tração das amostras e testes de fadiga, poderá ser notado que há relação muito próxima entre eles. De todas as curvas de carga-número de ciclos pode ser constatado que a impregnação com polímero melhora a carga máxima de ruptura sob esforço cíclico.

As Figuras 4a e 4b exibem o mecanismo de fratura durante aplicação

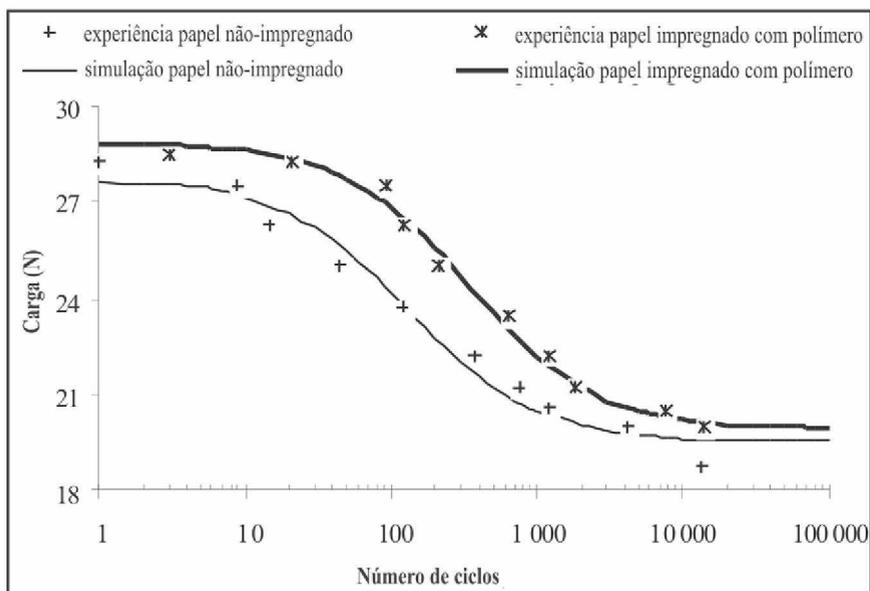


Figura 2. Curvas experimental e simulada de carga-número de ciclos para papel jornal direção MD não-impregnado e impregnado com polímero.

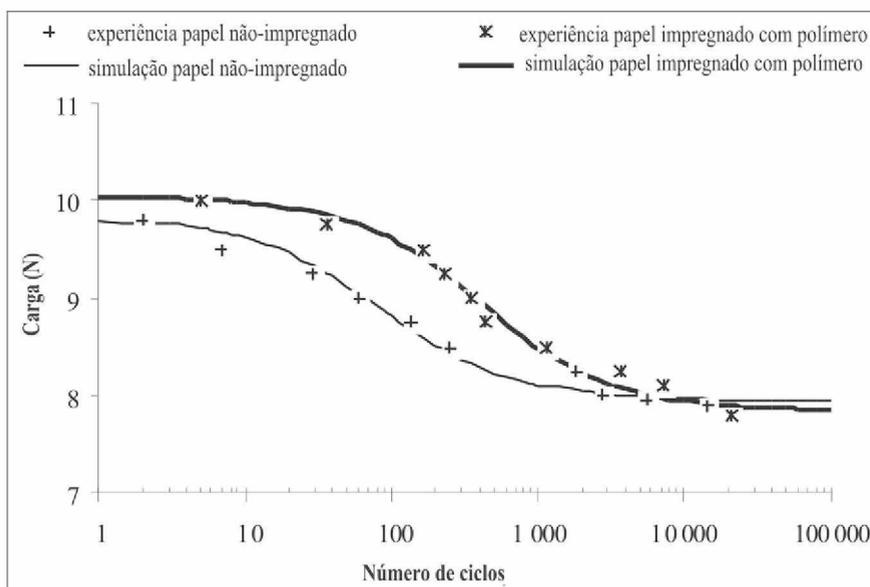


Figura 3. Curvas experimental e simulada de carga- número de ciclos para papel jornal direção CD não-impregnado e impregnado com polímero.

do ciclo de cargas em papel jornal direção máquina e direção transversal. Ao examinar fotografias de amostras impregnadas, a questão básica é que uma trinca começa a crescer, e é então retardada pela região impregnada com polímero. Quando a tensão externa é aumentada, inicia-se então uma trinca em sítio completamente diferente na amostra.

Com referência à Figura 4a, sob efeito cíclico a fratura se inicia na extremidade do entalhe onde há convergência da tensão. Quando a trinca atin-

ge a área impregnada com polímero ela é momentaneamente retardada, para depois desviar-se da direção inicial. A trinca realmente atravessa a região com polímero, mas ao fazer isso reduz o grau de propagação da trinca e aumenta o comprimento do seu caminho. Normalmente, a direção da fratura é alterada em cerca de $70^{\circ} - 80^{\circ}$ de sua direção primitiva, isto devido à presença da região com polímero e ao sentido de orientação das fibras. Por outro lado, devido ao fato de as fibras estarem no sentido máquina no sítio



(a)



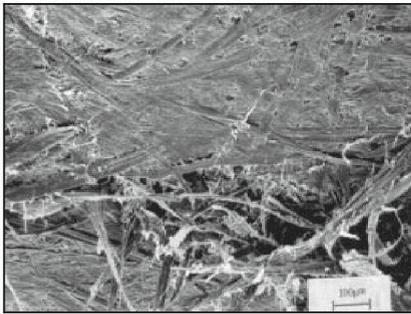
(b)

Figura 4. Mecanismo de iniciação e de propagação de trinca sob carga cíclica. (a) Mecanismo de fratura na direção transversal de amostra de papel jornal. (b) Mecanismo de fratura na direção longitudinal de amostra de papel jornal.

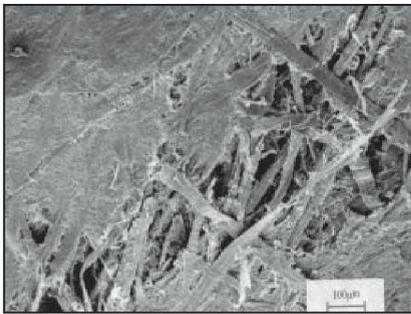
da folha onde a direção da trinca e a orientação das fibras se colocam em posição quase oposta, o mecanismo de fratura é aqui diferente daquele que acontece em papel com sentido transversal das fibras. Em amostras de papel com sentido máquina, a trinca inicia, é então ligeiramente retardada pela região do polímero, ao mesmo tempo em que na região acima do entalhe começa outra fratura, como é mostrado na figura 4b. Isto pode ser explicado pela orientação das fibras e/ou floculação.

Para melhor compreender os mecanismos de rompimento (arrancamento de fibra, ligação desfeita de fibra, ruptura) nestas amostras de papel não-impregnadas e impregnadas com polímero, e a interação do polímero e das fibras dentro da região sob carga cíclica, foram estudadas superfícies fraturadas utilizando-se microscopia eletrônica de varredura (SEM).

Estudos de Clemens sobre fratura de materiais compostos de fibra-polímero mostraram que o total de ener-



(a)



(b)

Figura 5. Fotomicrografias por microscópio eletrônico de varredura (SEM). (a) Na direção transversal a trinca segue caminho relativamente reto. (b) Na direção máquina a trinca tende a se desviar da linha reta.

gia do trabalho pode ser determinado somando-se os diferentes mecanismos dissipadores de energia. Estes são: trabalho da fratura das fibras; trabalho da fratura da matriz de polímero e trabalho pertinente a interações fibra-matriz (escorregamentos, ligação desfeita de fibra, arrancamento de fibra e fratura). As interações fibra-matriz podem ser extremamente complexas e são grandemente influenciadas pelas propriedades relativas da matriz e das fibras e pela compatibilidade dos dois componentes [18].

Como pode ser visto nas fotomicrografias SEM das figuras 5a e 5b, as características de iniciação e crescimento diferem uma da outra. São muitos os fatores que influenciam as características de iniciação e propagação da fratura. Como já enfatizado [19, 20], as propriedades da trama de fibras, resistência individual da fibra, comprimento e espessura das fibras, ligação fibra-fibra no interior do tecido fibroso, são fatores muito importantes a influenciar o comportamento da iniciação e propagação

da trinca. As micrografias indicam que o fator principal de diferenciação entre as amostras não-impregnadas e impregnadas é o percurso da ruptura. Em amostras não-impregnadas, a propagação da trinca encontra resistência nas fibras individuais e nas ligações fibra-fibra. Por sua vez, nas amostras impregnadas com polímero, a propagação da trinca encontra resistência nas regiões com polímero além das fibras individuais e das ligações fibra-fibra. Pode-se afirmar que em amostra não-impregnada, em regime de colapso, fibras são arrancadas e deslizam uma sobre a outra, ao passo que em amostras impregnadas com polímero, em regime de colapso, são vistos muitos fragmentos de fibras e fibras quebradas imersas na matriz de material polímero-fibra. É constatado arrancamento de fibras relativamente pequeno e é evidente um considerável fraturamento de fibras. Devido à interação entre polímero e malha de fibras, naquela região o polímero cobre as fibras e as mantém unidas.

CONCLUSÕES

Este estudo vem demonstrar que as diversas propriedades de resistência das amostras de papel jornal foram influenciadas positivamente por polímero como obstáculo retardador de trincas aplicado à superfície do papel por dispositivo de colagem superficial. Por sua vez, contudo, a impregnação com polímero influenciou negativamente a extensibilidade, particularmente na direção transversal do papel. Se destaca o fato de este mecanismo especial de retardamento de trincas ter mostrado resultados muito bons em situações de carga cíclica. O mecanismo baseia-se, principalmente, no efeito de deflexão do curso da trinca e no seu confinamento por meio de aplicação de poliestireno ao papel. Os resultados podem ser resumidos como segue:

Primeiramente, a trinca se inicia na ponta do entalhe feito na folha e se propaga até atingir a região impregnada com polímero. Na seqüência, o percurso da trinca é retardado pela região do polímero até que se complete a concentração de tensão, defletindo então, com direção dependente do sentido de ori-

entação das fibras. O desvio da trinca é principalmente influenciado pela orientação das fibras e pelo padrão de formação do tecido fibroso. Tem sido também influenciado pela situação da área impregnada com polímero em relação à linha de fratura.

Tem sido desenvolvida uma relação matemática descritiva do comportamento da vida de fadiga de papel jornal, tanto sentido máquina como sentido transversal, não-impregnado e impregnado com polímero. Pode-se afirmar que a equação desenvolvida neste trabalho pode ser utilizada na predição da vida de fadiga de amostras de papel. A iniciação e propagação da trinca foram monitoradas por microscopia. Também foi observado o efeito da impregnação com polímero na fratura do papel mediante microscopia SEM. De modo geral, o mecanismo de retardamento da trinca comprovou menores índices de crescimento de ruptura por fadiga em amostras impregnadas com polímero do que em amostras não-impregnadas, como resultado do retardamento da fratura e de seu confinamento. Contudo, tais benefícios das características de fadiga não podem ser assegurados caso a orientação das fibras se situar paralela ao plano da trinca.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Niskanen, K. (1993). "Strength and fracture of paper" Fundamental Research Symposium, 2, pp. 641-725.
- [2]. Roisum, D. R. (1990). "Runnability of paper. Part 2-troubleshooting web breaks" Tappi Journal, 73 (2): 102-106.
- [3]. Wanigaratne, D. M. S., Batchelor, W. J., Conn, A. B. and Parker, I. H. (2000). "Image analysis of plastic deformation in the fracture of paper" Appita Journal, 53 (5): 471-475.
- [4]. Howard, E. B. (1986). "Atlas of fatigue curves" in American Society for Metals Book Edited by E. Howard, Chapman and Hall Publ., London, pp. 1-15.
- [5]. Wild, P. M. and Provan, J. W. (1996). "Fatigue damage accumulation and failure mechanisms in single wood pulp fibres subjected to cyclic loading" Proceedings of the Sixth International Fatigue Conference, Berlin, p. 1597-1602.

- [6]. Page, D. H., El Hosseiny, F., Winkler, K. and Lancaster A. P. S. (1977). "Elastic modulus of single wood pulp fibres" *Tappi Journal*, 60 (4): 114-118.
- [7]. Mott, L. Shaler, S. M. and Groom, L. H. (1996). "A technique to measure strain distributions in single wood pulp fibres" *Wood Fibre Sci.* 28 (4): 429-432.
- [8]. Conn, A. B. and Batchelor W. J. (1999). "Conversion of an Instron to mechanical testing of single fibres" *Appita Journal*, 52 (4): 290-294.
- [9]. Kanazawa, T. and Machida, S. (1964). "Some basic considerations on a brittle crack arrester for welded steel structure" *J. Soc. Nav. Archt. Japan*, 115: 78-88.
- [10]. Duxbury, P. M. (1990). "Breakdown" In *Statistical Model for the Fracture of Disordered Media*, Edited by H. Errmann, pp. 210-225.
- [11]. Cetin, S., Karademir, A., Imamoglu, S., Ozmen, N., Tutus, A., Mengenglu, F. and Kurt, R. (2003). "Characterisation of the deformational behaviour of fibrous networks" *Proceedings of the International Conference "Chemical Technology of Wood, Pulp and Paper"*, 17-19 September 2003, Bratislava, Slovak Republic, pp. 214-220.
- [12]. Seth, R. S. and Page, D. H. (1987). "Fibre properties and tearing resistance" *Int. Paper Phys. Conf., Mt-Rolland, Que, CPPA*, pp. 9-16.
- [13]. Pelton, R., Zhang, J., Chen, N. and Moghaddamzadeh, A. (2003). "The influence of dextran molecular weight on the dry strength of dextran-impregnated paper" *Tappi Journal*, 2 (4): 85-89.
- [14]. Parsons, S. R. (1969). "Effect of interfibre bonding on tearing strength" *Tappi Journal*, 52 (7): 1262-1266.
- [15]. Hamad, W. Y., and Provan J. W. (1995). "Microstructural cumulative material degradation and fatigue-failure micromechanisms in wood-pulp fibres" *Cellulose Journal*, 2 (3): 159-177.
- [16]. Paepegem W. and Degrieck, J., (2000). "Experimental setup for bending fatigue of fibre reinforced composite materials" In *Fatigue 2000: Fatigue and Durability assesment of materials, components and structures*. Ed. M. R. Bache, Chamelon Press Ltd., Cambridge, pp. 115-122.
- [17]. Hamad, W. Y. (1991). "Least-square polynomial regression analysis program" in *Q Basic*, McGill University, Montreal, Canada.
- [18]. Clemens, C. (1995). "Exploratory microscopic investigation of impacted paper fibre-reinforced polypropylene composites" In *proceedings of Woodfibre-Plastic composites-Virgin and Recycled Wood Fibre and Polymer for Composites*. Madison, Wisconsin, May 1-3, 1995. pp. 173-179
- [19]. Imamoglu, S. (1996). "The effect of polymer impregnation on the fracture of paper" *Master Thesis, Univeristy of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST), Manchester, England*, p.103.
- [20]. Karademir, A., Imamoglu, S. and Cetin N. S. (2004). "Crack propagations and fatigue characteristics of some handmade papers" *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 28 (2): 115-124. ▲

INOX TUBOS