

# INFLUÊNCIA DA VISCOELASTICIDADE NO COMPORTAMENTO EM FLEXÃO A LONGO PRAZO DE DOIS LAMINADOS COMPÓSITOS

Rui Miranda Guedes, Mário Vaz

DEMEGI - Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, FEUP  
Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 PORTO, PORTUGAL

## RESUMO

*Neste trabalho são apresentados e discutidos os resultados obtidos num ensaio de fluência em flexão para laminados de CFRP. O objectivo deste trabalho é a caracterização do comportamento a longo prazo de laminados em material compósito para construção de suportes de detectores de radiação. As estruturas em causa deverão apresentar elevada estabilidade dimensional sob qualquer condição ambiental. A dependência temporal das propriedades dos laminados condicionadas pelas fibras revelou-se desprezável. Embora uma análise prévia apontasse para um melhor desempenho dos laminados obtidos a partir de tecido os resultados experimentais revelaram um melhor comportamento do laminado obtido de pré-impregnado unidireccional.*

## INTRODUÇÃO

Os materiais poliméricos reforçados com fibras (vidro, carbono, kevlar) constituem um grupo de materiais bastante versátil e útil para aplicações gerais de Engenharia. Na maior parte dos casos os custos da matéria-prima (fibras de vidro, resinas de poliéster e de epóxico, por exemplo) não são muito superiores aos materiais tradicionais. Nos casos em que os custos diferenciais são muito superiores (fibras de aramida e de carbono), as tecnologias de fabrico e de processamento estão de tal forma desenvolvidas que permitem compensar as diferenças de custo da matéria-prima com uma elevada eficiência de produção e comportamento mecânico. A lista das aplicações é já muito vasta e inclui as indústrias dos transportes, da energia, das aplicações médicas, do desporto, da construção civil e da defesa, só para enumerar os principais sectores.

Os materiais compósitos avançados de elevado desempenho permitem construir elementos estruturais onde os materiais

constituintes interagem entre si de tal forma que a sua resposta colectiva é superior à simples soma das respostas individuais dos constituintes. Este aspecto, característico destes sistemas, representa um grande desafio à comunidade científica, introduzindo a complexidade, a não linearidade, os problemas de escala, entre outros e exigindo o desenvolvimento de novos modelos de comportamento do ponto de vista mecânico, químico e físico. Este desafio é ainda maior quando se pretende um modelo de previsão do comportamento a longo prazo de sistemas compósitos sujeitos a carregamentos cíclicos que podem ser mecânicos, químicos ou térmicos. Nestes casos o desempenho do sistema material depende ainda do modo como essas cargas são aplicadas e da sua história.

As preocupações em torno do comportamento a longo prazo são a motivação principal deste trabalho. As propriedades dos materiais compósitos variam no tempo e são influenciadas pela interacção

das condições ambientais, como a variação de temperatura, com o estado de tensão. O comportamento viscoelástico destes materiais deve-se, principalmente, à natureza polimérica da matriz. Por sua vez, a amplitude das deformações viscoelásticas depende de uma série de factores, alguns já referidos, que incluem, entre outros, a sequência de empilhamento das camadas no laminado, o estado de tensão, a temperatura e a humidade.

O *European Laboratory for Particle Physics* - CERN, está actualmente envolvido na construção do novo acelerador de partículas, designado por LHC (*Large Hadron Collider*). Trata-se de um projecto de grandes dimensões que tem colocado novos desafios de Engenharia, principalmente no campo das aplicações dos novos materiais. Vários tipos de materiais compósitos têm sido seleccionados para aplicação, quer na construção de elementos estruturais do acelerador, quer na construção dos vários detectores de partículas. No caso destes últimos, a sua estabilidade dimensional a longo prazo é de importância capital pois, tratando-se de partículas que se movem a velocidades relativistas, pequenos erros de posicionamento conduzem a erros grosseiros na medida.

O INEGI está envolvido na caracterização de materiais compósitos avançados que terão aplicação na construção de alguns suportes para os detectores de partículas que integrarão o LHC. No âmbito deste trabalho um conjunto de ensaios de fluência, precedidos de ensaios de caracterização estática, foi executado nos laboratórios do INEGI. Com estes ensaios pretende-se caracterizar o comportamento à fluência de laminados submetidos a esforços inferiores a 10% da tensão de rotura. Foi eliminada a influência de factores ambientais, mantendo constante a temperatura e humidade relativa, e não se teve em conta o efeito das radiações na degradação das propriedades mecânicas. O fenómeno da viscoelasticidade foi restringido ao regime linear, isto é, independente do estado de tensão.

Com a presente metodologia pretendeu-se comparar o comportamento a longo prazo de diferentes laminados de resina epóxida reforçada com fibras de carbono, sendo uns

constituídos por camadas com reforços unidireccionais e outros por camadas com reforços em duas direcções ortogonais (tecido). Para o efeito mediram-se as deformações de fluência em flexão dos laminados, sob condições ambientais específicas. Na prática o método consistiu na medição das extensões, ao longo do tempo, através de extensómetros colados na superfície de provetes submetidos a uma carga constante.

## MATERIAL

Conjuntos de provetes com as dimensões de 5x20cm foram cortados de placas de compósitos laminados reforçadas com fibras de carbono. As placas foram fabricadas no INEGI, usando o pré-impregnado unidireccional UC 125 RNA e o tecido (*twill woven*) CC194 RNA. A resina epóxida RNA utilizada é a mesma para ambos os pré-impregnado, apresentado uma temperatura de cura de 125°C. As sequências de empilhamento utilizadas foram as seguintes:

- a) Laminado A: UC 125 RNA [0°/45°/90°/-45°]<sub>2s</sub>
- b) Laminado B: UC 125 RNA [0°/90°]<sub>4s</sub>
- c) Laminado C: CC194 RNA [0°]<sub>4s</sub>

A geometria dos provetes utilizados vem indicada nas tabelas 1-3.

## PROPRIEDADES ESTÁTICAS DE FLEXÃO

A fim de garantir que os ensaios decorressem no domínio linear viscoelástico do material, o nível máximo da tensão imposta foi limitado a 10% da tensão de rotura. Naturalmente, para calcular as cargas utilizadas nos ensaios de fluência, foi necessário fazer uma caracterização estática dos laminados.

As propriedades da camada haviam sido previamente determinadas nos laboratórios do INEGI, recorrendo a ensaios convencionais. Na tabela 4 é feito um resumo dessas propriedades.

**Tabela 1:** Geometria dos provetes retirados do laminado UC125 RNA [0°/45°/90°/-45°]<sub>2s</sub>

Provete	A1	A2	A3	A4
h (mm)	2.32 +/-0.01	2.36 +/-0.04	2.35 +/-0.01	2.32 +/-0.01
B (mm)	48.87 +/-0.03	50.08 +/-0.04	50.42 +/-0.06	49.51 +/-0.16

**Tabela 2:** Geometria dos provetes retirados do laminado UC125 RNA [0°/90°]<sub>4s</sub>

Provete	B2	B3	B4
h (mm)	2.30 +/-0.01	2.28 +/-0.03	2.26 +/-0.02
B (mm)	49.36 +/-0.16	49.76 +/-0.10	49.48 +/-0.47

**Tabela 3:** Geometria dos provetes retirados do laminado CC194 RNA [0°]<sub>4s</sub>

Provete	C4	C5	C6	C7
h (mm)	2.00 +/-0.01	2.02 +/-0.01	2.01 +/-0.00	2.02 +/-0.01
B (mm)	48.91 +/-0.13	49.22 +/-0.02	48.28 +/-0.04	47.26 +/-0.11

**Tabela 4.** Propriedades das camadas.

Camada	E <sub>1</sub> (GPa)	E <sub>2</sub> (GPa)	ν <sub>12</sub>	G <sub>12</sub> (GPa)
UC125 RNA	92.05	11.69	0.25	3.7
CC194 RNA	53.57	53.57	0.058	3.8

Na caracterização estática foram ensaiados 3 provetes, representativos de cada laminado, em flexão em 3 pontos até à rotura (Figura 1).

No cálculo das propriedades mecânicas foram utilizadas as seguintes fórmulas (Williams 1980, Tarnolpols'skii 1985):

a) Tensão de rotura

$$\sigma_{rot} = \frac{3PL}{2Bh^2} \left[ 1 + 6 * (w_{max}/L)^2 - 4 * (w_{max} h/L^2) \right] \quad (1)$$

b) Módulo aparente à flexão

$$E = \frac{L^3}{4Bh^3} m \quad (2)$$

onde *m* representa o declive da recta tangente à porção inicial da curva do carregamento em função da flecha máxima.

Na caracterização estática foram ensaiados 3 provetes, representativos de cada laminado, em flexão em 3 pontos até à rotura (Figura 1).

No cálculo das propriedades mecânicas foram utilizadas as seguintes fórmulas (Williams 1980, Tarnolpols'skii 1985):

c) Tensão de rotura

$$\sigma_{rot} = \frac{3PL}{2Bh^2} \left[ 1 + 6 * (w_{max}/L)^2 - 4 * (w_{max} h/L^2) \right] \quad (1)$$

d) Módulo aparente à flexão

$$E = \frac{L^3}{4Bh^3} m, \quad (2)$$

onde *m* representa o declive da recta tangente à porção inicial da curva do carregamento em função da flecha máxima.

Na tabela 5 é feito um resumo dos resultados obtidos para o módulo de Young à flexão e para a tensão de rotura.

**Tabela 5.** Propriedades dos laminados obtidos em ensaios de flexão estática.

Laminado	E <sub>b</sub> (GPa)	σ <sub>r</sub> (MPa)
A	38.83 ± 0.25	642 ± 15.5
B	47.40 ± 1.14	855 ± 8.7
C	42.20 ± 0.28	725 ± 7.2

Verifica-se assim que os laminados B (UC125 [0°/90°]<sub>4s</sub>) apresentam uma rigidez,

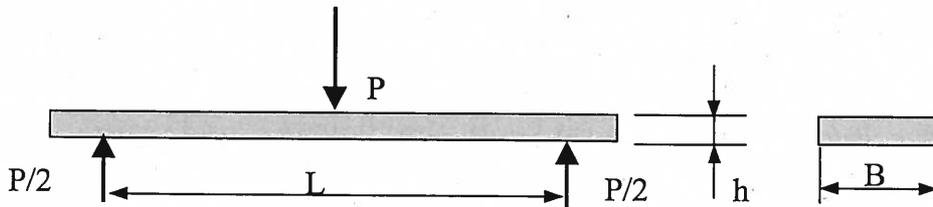


Fig 1: Ensaio de flexão em 3 pontos.

para uma fracção volúmica de fibras idêntica, ligeiramente superior aos laminados C (CC194 [0°]<sub>4s</sub>). Isto pode ser explicado pelo entrelaçamento das fibras no tecido o que reduz um pouco o seu desempenho.

### EQUIPAMENTO UTILIZADO NOS ENSAIOS DE FLUÊNCIA

De modo a serem testados vários provetes em simultâneo, foi montada uma estrutura que permitiu instalar 7 provetes na configuração indicada na figura 2, onde se mostra em pormenor a geometria do teste: Como se pode observar o ensaio consiste numa viga em consola solicitada na extremidade, sendo as extensões medidas numa secção próxima da zona de encastramento.

Devido as limitações no controlo da temperatura e humidade dentro do laboratório,

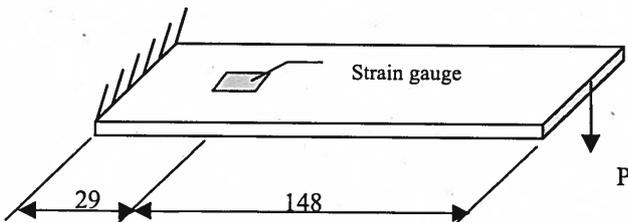


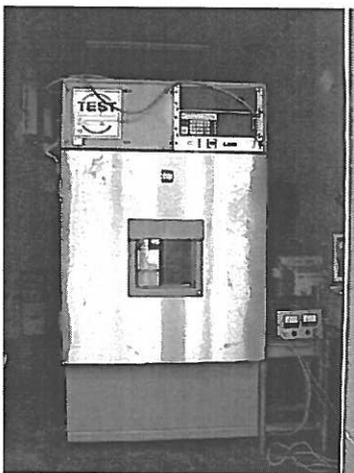
Fig 2: Geometria do teste em flexão.

recorreu-se a uma câmara ambiental para criar as condições de ensaio, com se mostra na figura 2. Dentro da câmara, durante a realização dos ensaios, a temperatura e a humidade relativa foram mantidas em  $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  e  $50\% \pm 2\%$ , respectivamente (Figura 3a).

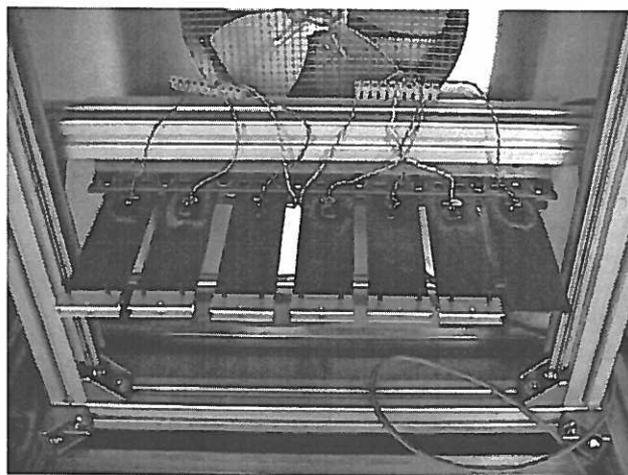
Na figura 3b a estrutura utilizada no ensaio pode ser observada dentro da câmara ambiental, note-se que os provetes já estão montados sem qualquer carga aplicada.

O sistema automático para o registo do ensaio foi garantido por um placa de aquisição de dados SOLARTRON, na figura 4, acoplada a um computador para gravação e tratamento posterior dos dados, na figura 5.

Os extensómetros utilizados foram fornecidos pelo fabricante HBM e tinham referência 1-LY41-10/350 com 10 mm de comprimento, uma resistência de  $350 \Omega$  e um factor de sonda (gauge factor) de 2,05. O adesivo aplicado foi fornecido pelo mesmo fabricante com a referência X 60, trata-se de uma cola de cura rápida à temperatura ambiente com dois componentes que permite utilizações até aos  $80^{\circ}\text{C}$ .



(a)



(b)

Fig 3: (a) Aspecto geral da câmara ambiental; (b) Dispositivo de ensaio dentro da câmara ambiental.

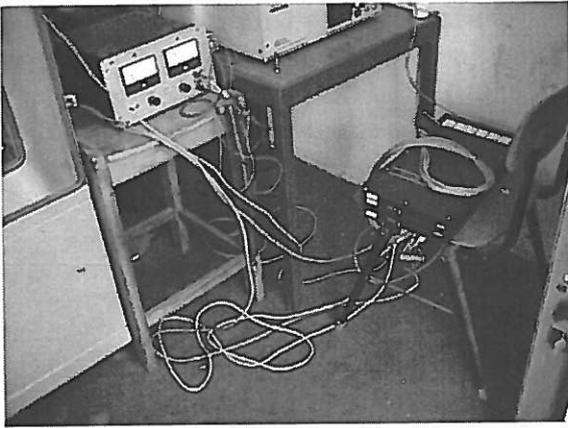


Fig 4: Sistema de aquisição de dados.



Fig 5: Computador utilizado na leitura e registo dos dados.

## RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLUÊNCIA

A aquisição dos dados experimentais em ensaios de fluência envolve o registo de grande quantidade de valores. Assim sendo é óbvio que o registo e o tratamento numérico se pode tornar muito pesado, criando a necessidade de condensar os dados e filtrar o ruído existente sem alterar o conteúdo da informação recolhida. Sabemos que os dados de fluência podem ser representados através da série de Prony (Guedes et al. 1999),

$$\varepsilon_{flu}(t) = A_0 + \sum_{i=1}^m A_i e^{-\lambda_i t}, \quad (3)$$

onde  $A_0$ ,  $A_i$  e  $\lambda_i$  são parâmetros característicos de cada curva.

Usando um termo da equação (3) podemos representar o comportamento do material para uma década de tempo. Para os resultados experimentais optamos por calcular um termo

para cada 1/10 de década, obtendo uma constante de tempo para a condensação que é um 1/10 da constante de tempo da resposta esperada. Trata-se assim de um método conservativo que elimina o risco de alterar a informação. O algoritmo pode ser descrito em três passos:

- 1) Cada década de tempo é dividida em dez intervalos de tempo iguais na escala logarítmica;
- 2) Os pontos desse intervalo são ajustados, usando o método dos mínimos quadrados, a um único termo exponencial

$$\varepsilon = A \cdot e^{B \cdot t} \quad (4)$$

- 3) Os  $n$  pontos desse intervalo são substituídos por  $\bar{\varepsilon}$  e  $\bar{t}$  onde

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad \bar{\varepsilon} = A \cdot e^{B \cdot \bar{t}}. \quad (5)$$

A utilização deste algoritmo permite condensar os dados experimentais de acordo com o comportamento esperado para o material, actuando em simultâneo como um filtro passa baixo.

Os resultados dos ensaios de fluência, obtidos ao longo de 1100 horas, são mostrados nos gráficos das figuras 6 e 7. Os resultados dizem respeito à flexibilidade de fluência que se define como sendo

$$S(t) = \frac{\varepsilon_{\max}}{\sigma_{\max}}, \quad (6)$$

onde  $\varepsilon_{\max}$  representa o valor medido pelo extensómetro e  $\sigma_{\max}$  calculado pela expressão:

$$\sigma_{\max} = \frac{888}{B \cdot h^2} \cdot P. \quad (7)$$

Em todos os provetes foi colado um extensómetro na superfície que se encontra submetida à tracção, havendo porém dois provetes, A2, B2 e C5 aos quais também foram colados extensómetros na superfície oposta que se encontra sob compressão. Os resultados obtidos para B2(C) mostram

alguma discrepância nos valores iniciais o que pode indicar problemas no adesivo do extensómetro.

Inicialmente os ensaios dos laminados A e B foram conduzidos à temperatura ambiente. Ao fim de 1000h concluiu-se que as extensões se mantiveram quase constantes, evidenciando o efeito muito lento da fluência (Figura 9). Assim decidiu-se acelerar o fenómeno, aumentando a temperatura de ensaio para

50°C. De facto, a esta temperatura, verificou-se uma aceleração do fenómeno para os laminados B e C. Os laminados A mostraram-se insensíveis a este aumento de temperatura. Na Figura 7 apresentam-se os resultados obtidos para a temperatura de 50°C, verificando-se que os laminados C apresentam uma deformação por fluência mais elevada.

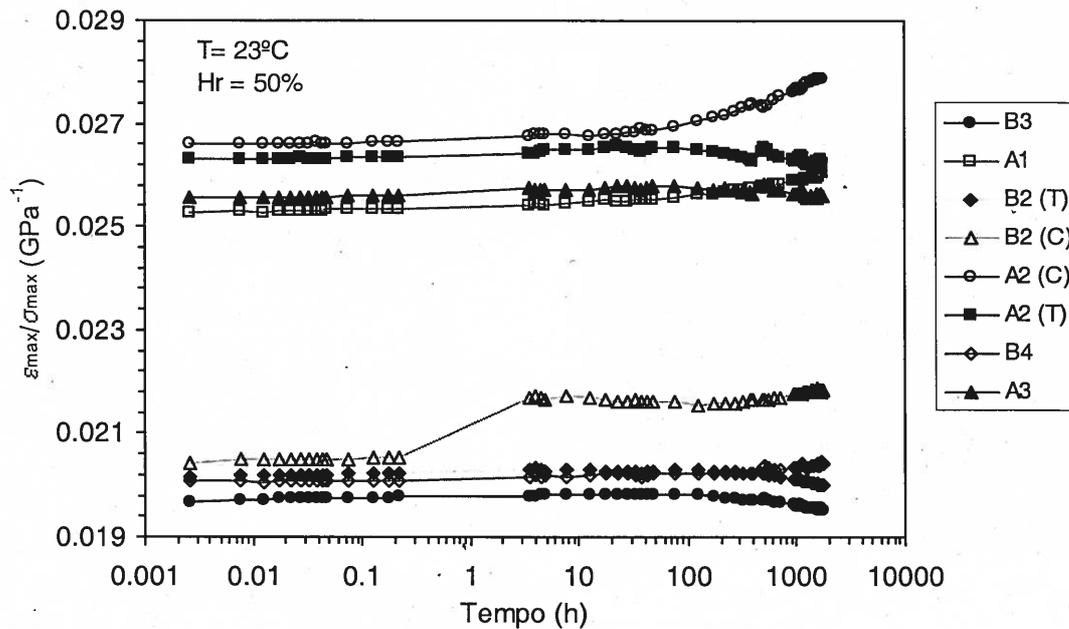


Fig 6: Flexibilidade de fluência dos laminados A e B ensaiados à temperatura ambiente.

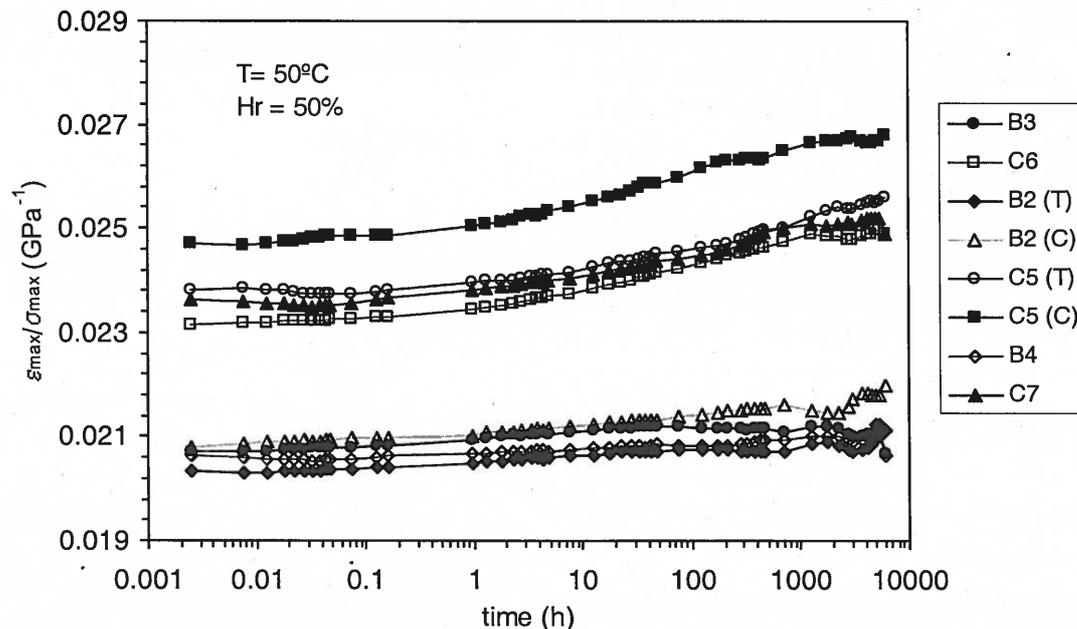


Fig 7: Flexibilidade de fluência dos laminados B e C ensaiados a uma temperatura de 50°C.

## DISCUSSÃO

De modo a melhor comparar os resultados experimentais obtidos, os valores obtidos para a flexibilidade de fluência foram normalizados. Assim a flexibilidade de fluência normalizada vem dada por,

$$S_R(t) = \frac{S(t)}{S_0}, \quad (8)$$

onde  $S(t)$  = flexibilidade de fluência;  $S_0$  = flexibilidade instantânea ( $t=0$ ) e  $S_R(t)$  = flexibilidade de fluência normalizada.

Depois de se ter verificado que à temperatura ambiente o fenómeno era muito lento, optou-se por prosseguir os ensaios a uma temperatura mais elevada, 50°C. Com isto pretendeu-se acelerar o fenómeno, evitando aumentar as cargas de ensaio e mantendo-o no domínio linear. Verificou-se que os laminados **A** mantiveram um comportamento inalterado. Contudo, os laminados **B** mostraram um aumento da extensão de 2,5%, em média e os laminados **C** um aumento médio de 6,7%. Os resultados experimentais mostraram também que o comportamento em fluência da zona em compressão era muito semelhante ao da zona em tracção. Surpreendentemente os resultados evidenciaram uma maior sensibilidade à fluência para os laminados **C** (tecido).

Os laminados reforçados com tecidos têm uma estrutura complexa devida ao entrelaçamento das fibras, fazendo com que as mesmas não estejam completamente esticadas. Por outro lado a sua disposição origina também estados de tensão mais complexos que nos laminados reforçados com fibras unidireccionais. Daí resulta que nos tecidos simples esforços axiais induzam tensões de corte não desprezáveis (Cox 1997).

Nas Figuras 8 e 9 os resultados de fluência são representados em comparação com um modelo empírico, lei da potência (Findley 1989), dado por;

$$S(t) = S_0 + S_1 \left( \frac{t}{\tau_0} \right)^n \quad (9)$$

onde  $S_0$  = flexibilidade instantânea (independente do tempo);  $S_1$  = flexibilidade transiente (dependente do tempo);  $n$  = constante material; and  $\tau_0$  = unidade de referência do tempo (1s, 1min, 1h, etc.).

Na Tabela 6 indicam-se os valores obtidos para os parâmetros do modelo, para a temperatura de 50°C e para o tempo de referência  $\tau_0$  de 1h, utilizando os resultados experimentais das primeiras 100h.

**Tabela 6:** Parâmetros da lei da potência determinados para os laminados **B** e **C**, para 50°C.

Laminado	$S_0$ (GPa <sup>-1</sup> )	$S_1$ (GPa <sup>-1</sup> )	$n$
<b>B</b>	0.01639	0.004424	0.01
<b>C</b>	0.02354	0.000559	0.18

Nos laminados **B** o modelo consegue extrapolar os resultados para as 3000h com bastante sucesso. No caso dos laminados **C** verifica-se também que o modelo consegue extrapolar os resultados obtidos para as 100h, aproximando os resultados experimentais com bastante rigor. No entanto, a partir dessa altura o modelo diverge dos resultados experimentais que apresentam uma redução drástica da velocidade de deformação por fluência.

As deformações de fluência que se mediram experimentalmente foram inferiores a 200µε, sendo os valores da deformação inicial de 1500µε. Possivelmente os extensómetros eléctricos não são os dispositivos de medida mais recomendáveis, dado se tratar de ensaios de longa duração. No entanto foi o único método na altura disponível para medir as extensões dentro da câmara ambiental.

## CONCLUSÕES

O comportamento viscoelástico linear é, geralmente, observado para níveis de tensão baixos. Deduz-se assim que para o nível de tensão imposto nos ensaios, inferior a 10% da tensão de rotura, o comportamento se mantenha no domínio linear.

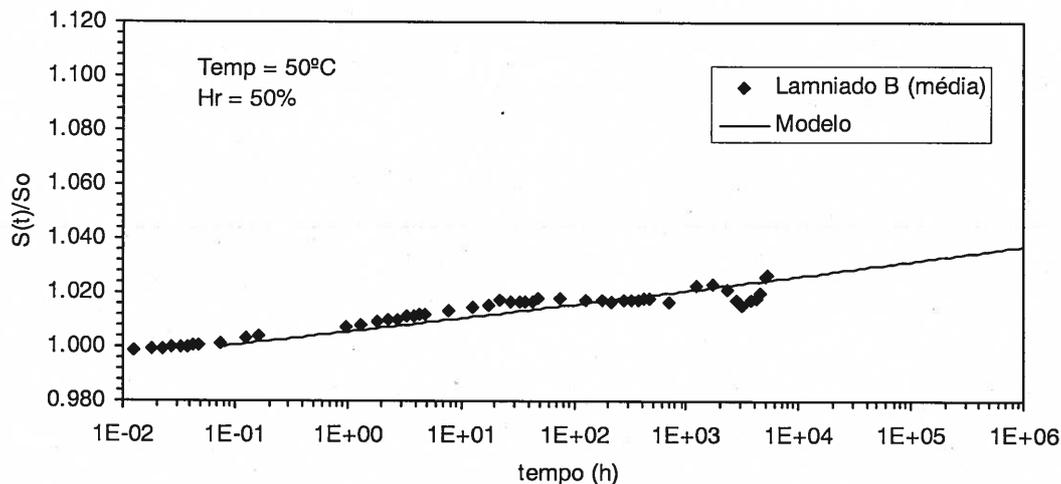


Fig 8: Flexibilidade de fluência normalizada média dos laminados **B** ensaiados à temperatura de 50°C.

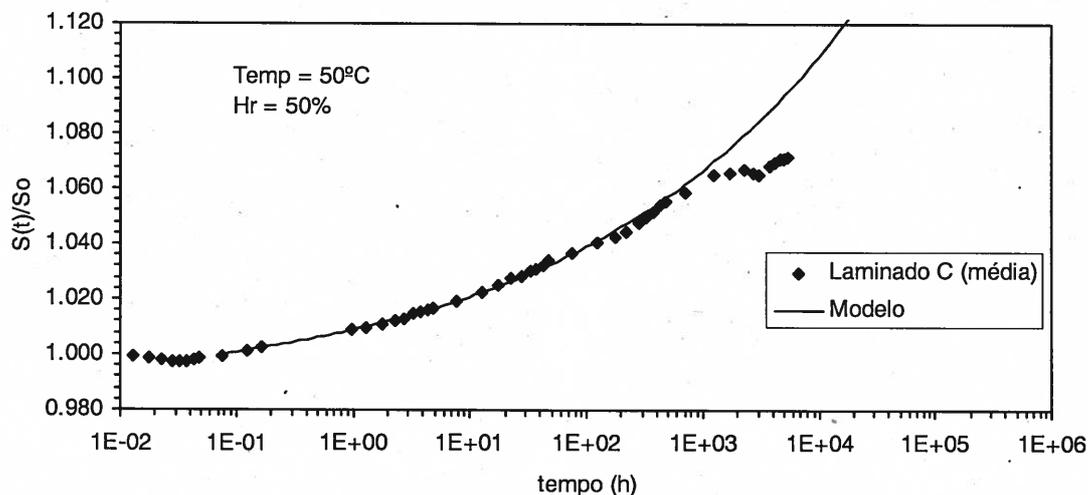


Fig 9: Flexibilidade de fluência normalizada média dos laminados **C** ensaiados à temperatura de 50°C.

Para muitos compósitos reforçados com fibras contínuas, a dependência do comportamento em função do tempo das propriedades mecânicas dominadas pelas fibras,  $E_{11}$  e  $\nu_{12}$  é desprezável quando comparada com as propriedades dominadas pela matriz. Analisando as sequências de empilhamento, utilizadas neste estudo, verifica-se a existência de fibras na direcção do carregamento fazendo prever deformações de fluência reduzidas ou mesmo nulas. Contudo, internamente, o processo deverá desencadear fenómenos de relaxação de tensões, nas camadas orientadas em ângulos diferentes de 0°, e a transferência tensões para as camadas orientadas a 0°.

De facto os resultados experimentais vieram confirmar as hipóteses de partida, registando-se valores das deformações de

fluência desprezáveis à temperatura ambiente. Note-se que as flutuações registadas estão relacionadas com imprecisões do sistema electrónico de medida. Apesar da sua sofisticação não impede que haja erros de leitura dos extensómetros que podem atingir os  $\pm 20\mu\epsilon$ .

Verificando-se que à temperatura ambiente o fenómeno era muito lento, optou-se por prosseguir os ensaios a uma temperatura mais elevada, 50°C. Com isto acelerou-se o fenómeno em estudo. Assim, estes novos ensaios permitiram verificar que os laminados **B** e **C** apresentam valores de deformação em fluência não desprezáveis. Verificou-se ainda que os laminados **C**, reforçados com tecido, são mais sensíveis ao fenómeno da fluência que os laminados **B**, reforçados com fibras unidireccionais. Apesar de ambos os

laminados podem ser considerados equivalentes, a distribuição interna das tensões é bastante diferente, contribuindo de forma decisiva para o seu desempenho estrutural. A lei de potência permitiu representar os dados experimentais com bastante rigor. Verificou-se ainda que os resultados obtidos para as primeiras 100h permitem extrapolar para as seguintes 2000 a 3000h com uma boa aproximação aos resultados experimentais. No entanto, o modelo falha na extrapolação acima das 1000h, no caso dos laminados C, devido a uma alteração do seu comportamento. Aparentemente, a partir dessa altura a velocidade de deformação devida à fluência reduz-se substancialmente, divergindo do comportamento previsto pelo modelo.

## REFERÊNCIAS

- Cox, B. & Flanagan, G., 1997, Handbook of Analytical Methods for Textile Composites, NASA Contractor Report 4750.
- Findley, W. N., Lai, J. S. and Onaran, K., (1989). *Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials*. Dover Publications, Inc., New York.
- Guedes, R.M., Marques, A.T., Cardon, A., 1999, Creep/Creep-Recovery Response of Fibredux 920C-TS-5-42 Composite under Flexural Loading, Applied Composite Materials, Vol. 6, pp. 71-86.
- Tarnopols'skii, Yu. M. and Kincis, T., 1985, Static Test Methods for Composites, Van Nostrand, Reinhold, New York.
- Williams, J.G., 1980, Stress analysis of Polymers, Ellis Horwood series in mechanical engineering.

