

COMPORTAMENTO À FLUÊNCIA DE PAINÉIS SANDWICH EM GFRP

J. A. Martins Ferreira, J. D. Moreira da Costa e J. A. A. Almeida
Dep. de Eng. Mecânica, Universidade de Coimbra, Pinhal de Marrocos, 3030 Coimbra, Portugal



RESUMO

Este trabalho apresenta resultados de um estudo sobre o comportamento à fluência de um novo tipo de painel sandwich fabricado com uma espuma de PVC como núcleo e duas camadas superficiais de compósito laminado reforçado com fibra de vidro. No centro do painel são inseridos anéis de reforço transversal em compósito com fibra de vidro, unindo as duas camadas superficiais (laminados).

Os painéis foram ensaiados em flexão em quatro pontos tendo sido analisada a fluência à temperatura ambiente. A fluência das camadas superficiais foi também estudada, tendo sido ensaiados à tracção. As curvas de deformação-tempo obtidas nos painéis e nos laminados apresentam duas regiões distintas e em ambos os casos a fluência primária é muito pequena. A variação do módulo de Young dos painéis e dos laminados foi também determinada durante os ensaios tendo sido obtida uma relação linear entre E e o logaritmo do tempo.

Palavras chave

Compósitos poliméricos, painéis sandwich, fluência.

INTRODUÇÃO

Recentemente, em muitas aplicações os metais tem vindo a ser substituídos por materiais compósitos, em virtude das suas vantagens relativamente a algumas propriedades mecânicas, físicas e mesmo químicas. Em geral, o uso de um material compósito permite reduzir o peso da construção e aumentar a resistência à corrosão e a capacidade de absorção de energia.

As estruturas em sandwich oferecem um aumento da relação rigidez/peso sendo especialmente aconselhadas para aplicações em que o factor peso é determinante e é necessária uma elevada rigidez à flexão. Os

painéis sandwich permitem ainda otimizar a forma da estrutura adequando a constituição e forma do núcleo e das camadas superficiais. (Gilchrist *et al*, 1993) analisaram vários aspectos da resistência e fadiga de vigas em I. A combinação adequada de materiais e formas permite para além da rigidez das construções sandwich, outras características importantes como boas propriedades térmicas e acústicas e elevada resistência ao choque. Tirando vantagem destas características as construções sandwich são frequentemente usadas em aplicações como estruturas para aviões, barcos de alta velocidade, contentores e na construção civil.

Aço, alumínio e compósitos laminados são usados nas camadas superficiais das construções sandwich. Os compósitos laminados podem usar como reforço

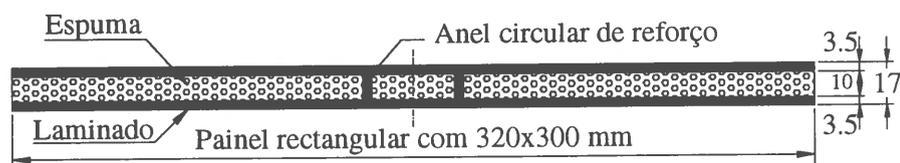


Fig.1-Esquema e dimensões dos painéis sandwich.

filamentos em vidro, carbono, aramida, etc. O núcleo é construído em geral de materiais anisotrópicos, como o carvão, madeira e espumas poliméricas celulares.

Em estudo recente Rotchild *et al.*, (1994) desenvolveu um método simples para modelar o comportamento não linear de painéis sandwich construídos em espumas celular rígidas. Gibson *et al.*, (1989) fazem uma revisão bibliográfica do comportamento não linear de materiais celulares.

Os materiais poliméricos geralmente apresentam fluência à temperatura ambiente. Em painéis estruturais o comportamento à fluência é um factor de projecto fundamental. Este tópico tem sido estudado recentemente, sendo referidos na literatura alguns trabalhos como (Little *et al.*, 1995) e (Lowe *et al.*, 1994).

O objectivo do estudo em curso é caracterizar o comportamento estático e à fluência de um novo painel sandwich desenvolvido pela industria nacional. A análise das tensões e deformações ao painel é feita com base na teoria das vigas (Shigley *et al.*, 1983), podendo a rigidez e a resistência do painel ser obtidas a partir das propriedades do núcleo e dos laminados (Johnson *et al.*, 1987). Neste trabalho são apresentados e discutidos resultados da fluência de painéis em flexão em quatro pontos e dos laminados à tracção.

MATERIAIS E PROCESSO DE FABRICO

Os painéis foram construídos usando dois compósitos laminados como camadas

superficiais coladas a um núcleo constituído por uma espuma PVC. As camadas superficiais são ligadas entre si por um tubo de reforço "tie" de compósito reforçado com fibra de vidro (fig. 1). O objectivo deste reforço é aumentar a rigidez ao corte do painel.

Os compósitos laminados (fig. 1) foram fabricados com uma sequência de cinco camadas, quatro delas com fibras alinhadas e uma delas com distribuição aleatória de fibras. Esta última camada é a colocada em contacto com o núcleo. A orientação das fibras das restantes camadas varia em 45° de camada para camada. As quatro camadas orientadas irão ter pequenas diferenças de fracção volumétrica de fibra, sendo conseqüentemente de esperar um comportamento anisotrópico dos painéis mesmo para solicitações no plano do painel. Foi feito um furo no centro do núcleo interior do painel com um diâmetro de 25 mm. O anel de reforço, "tie", foi colocado neste furo e a espuma foi cortada do núcleo no interior do anel.

Os laminados foram preparados num molde de madeira. Cada camada era colocada com a mesma quantidade de resina e homogeneizada pelo menos com duas passagens. A espuma era aplicada de seguida e um segundo laminado era preparado noutro molde, com excepção da última camada de orientação aleatória de fibra que era colocada em cima da espuma no primeiro molde depois da aplicação do anel de reforço. Finalmente, o segundo molde é invertido e colocado sobre o primeiro. Sobre os moldes é aplicado um peso de 50 Kg.

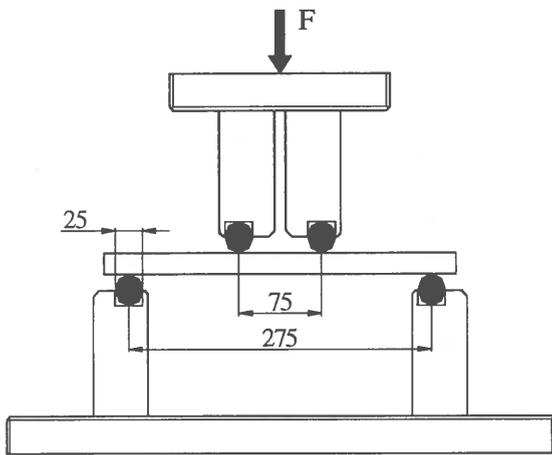


Figura 2a) – Vista esquemática dos ensaios de flexão em 4 pontos nos painéis.

As fibras usadas nos laminados foram vidro tipo E e a resina foi epoxi. A cura da resina foi feita a 80 °C durante 8 horas. Este ciclo de cura foi escolhido para otimizar as propriedades mecânicas do laminado.

Os painéis foram cortados com as dimensões de 300x320 mm, de forma a terem dimensões adequadas para as máquinas de ensaio disponíveis. Dado o comportamento anisotrópico previsto para os painéis estes foram ensaiados segundo duas direcções ortogonais tomando como referência as direcções das fibras dos laminados. Considerando como referência as tensões normais causadas por tracção ou flexão, as quatro camadas superficiais dos laminados apresentam as seguintes sequências 0/-45/90/+45 ou 90°/+45/0/-45°. Aos ensaios realizados segundo a primeira sequência serão designados de direcção longitudinal (L) e à segunda sequência de transversal (T).

Os painéis foram ensaiados à flexão em quatro pontos, como se mostra esquematicamente na figura 2a). Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente. Os compósitos laminados foram também ensaiados à fluência em tracção, usando para o efeito os provetes apresentados na fig. 2b). Todos os ensaios foram realizados

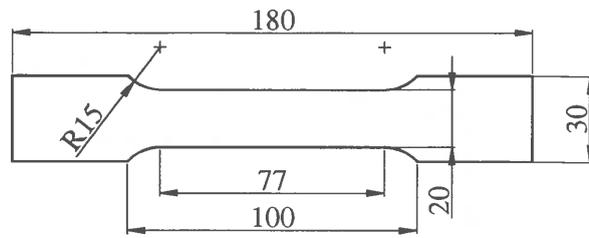


Figura 2b) – Geometria dos provetes dos laminados.

numa máquina electromecânica INSTRON controlada por computador.

Durante os ensaios de fluência os valores da carga, do deslocamento e do tempo foram armazenados no computador. Usando o software adequado foram calculadas as tensões e deformações e traçadas as curvas de deformação-tempo. No início dos ensaios e após incrementos de tempo pré-definidos era feita uma descarga parcial sendo traçadas as respectivas curvas carga-deslocamento. O incremento de tempo entre dois registos aumentava durante o ensaio, pois a fase na qual se verifica uma maior variação de rigidez é a fase inicial. A partir das curvas carga-deslocamento era determinado o módulo de elasticidade, E. Nos ensaios de flexão em 4 pontos dos painéis o deslocamento medido foi a deflexão a meio do vão. Este deslocamento permitiu obter as deformações usando a teoria das vigas (Shigley *et al*, 1983).

RESULTADOS

Nos ensaios de fluência a dependência da deformação com o tempo foi analisada para os painéis e nos laminados, tendo em consideração que a rigidez é controlada pela visco-elasticidade da matriz polimérica.

Nos ensaios dos laminados obtiveram-se curvas de deformação-tempo muito semelhantes para ambas as direcções de carga, apresentando apenas dois estágios, não ocorrendo o 3º estágio típico nos

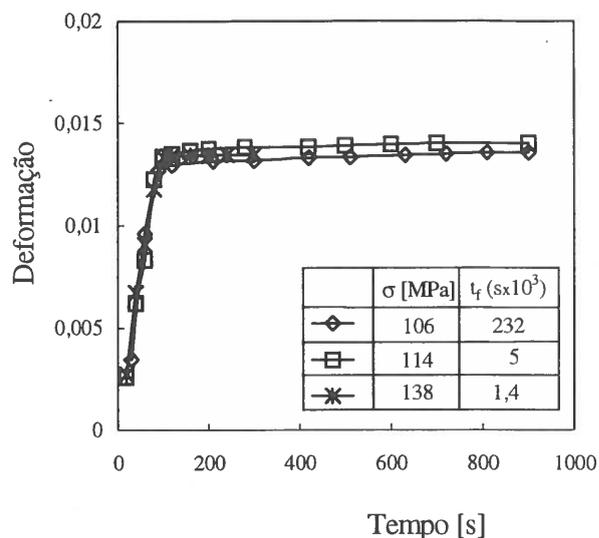
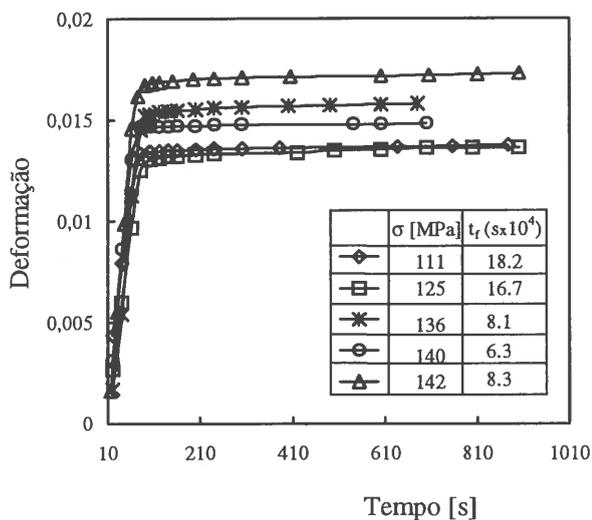


Figura 3 – Curvas deformação-tempo nos laminados: a) direcção T; b) direcção L

materiais metálicos. A rotura dos laminados ocorre subitamente, portanto sem ocorrência do 3º estágio. O primeiro estágio, durante o qual o aumento de deformação ocorre com diminuição da taxa de deformação é muito curto e corresponde aproximadamente, apenas aos primeiros 100 segundos de aplicação da carga. Segue-se o segundo estágio durante o qual a deformação cresce linearmente com o tempo (taxa de deformação constante e muito pequena). As figuras 3a) e 3b) mostram os gráficos da deformação-tempo, para alguns dos ensaios realizados, para as direcções L e T, respectivamente. Estes gráficos incluem a zona de fluência primária e parte do regime secundário, indicando ainda o tempo de rotura final t_f de cada um dos provetes.

O tempo gasto na fluência primária é representado na figura 4 para ambas as direcções de carga. A análise desta figura mostra uma redução do tempo de fluência primária de 120 para 80 segundos quando a tensão cresce de 105 para 145 MPa. As figuras 5a) e 5b) apresentam algumas das curvas deformação-tempo, apenas para o regime de fluência primária, para as

direcções L e T, respectivamente. O andamento destas curvas é semelhante em todos os ensaios e para diferentes níveis de tensão. Em geral, a deformação no final deste estágio aumenta com a tensão aplicada. Esta análise mostra um tempo de 1º estágio muito pequeno e praticamente sem significado quando comparado com o vida total do provete, mas a deformação no final deste regime atinge um valor bastante significativo quando comparada com a deformação total no instante da rotura.

Nos ensaios dos painéis realizados em flexão em quatro pontos registou-se a variação da deflexão a meio do vão em função do tempo. Usando as equações da teoria das vigas (Shigley et al, 1983) calcularam-se os valores da deformação. Na figura 6 representam-se as curvas da deformação-tempo nos painéis para as duas direcções de carga e dois níveis de tensão. Estes ensaios foram interrompidos antes da rotura final dada a grande deflexão observada. A forma destas curvas é semelhante às curvas obtidas para os laminados, embora a taxa de deformação do regime secundário seja nestes casos muito mais elevada.

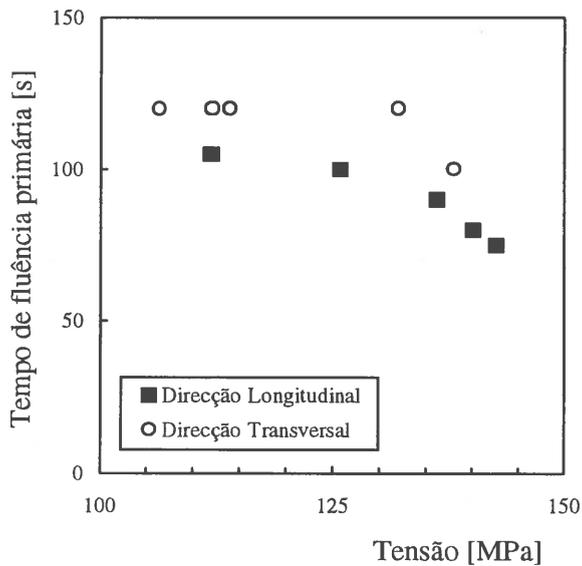


Figura 4 – Tempo gasto na fluência primária dos laminados.

A fluência primária é agora relativamente elevada (muito mais do que nos laminados), variando entre 1000 e 8000 segundos. Tanto nos painéis como nos laminados entre os regimes primário e secundário foi observada uma zona de transição, em que a dependência da deformação em relação ao tempo é não linear. Esta zona é bastante curta nos laminados ($\cong 100$ segundos) mas é bastante longa nos painéis (entre 20000 e 50000 segundos). As diferenças de comportamento entre a fluência do painel à flexão e dos laminados em tracção mostra que o comportamento à fluência do painel

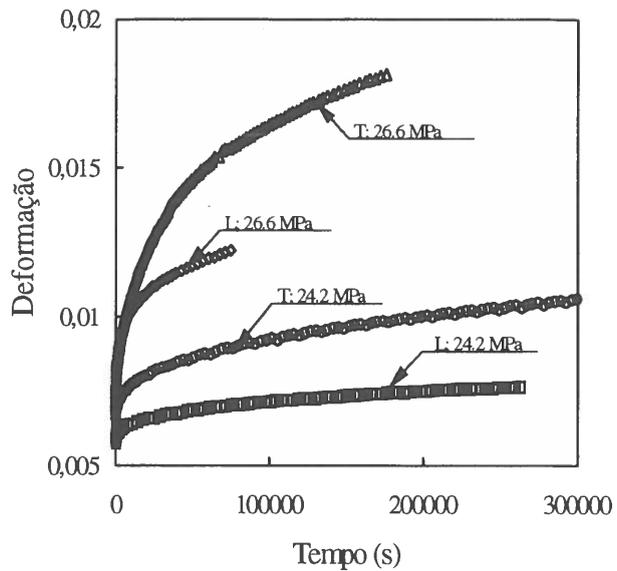


Figura 6- Curvas deformação-tempo para os painéis.

será essencialmente influenciado pelo comportamento da espuma do núcleo.

A dependência da deformação em relação ao tempo para uma dada tensão, nos regimes primário e secundário, foi modelada pelas equações:

$$\text{Regime primário: } \varepsilon = n \log t + A$$

$$\text{Regime secundário: } \varepsilon = \varepsilon_0 + Kt$$

Em que:

ε = deformação

n e A = coeficientes de regressão

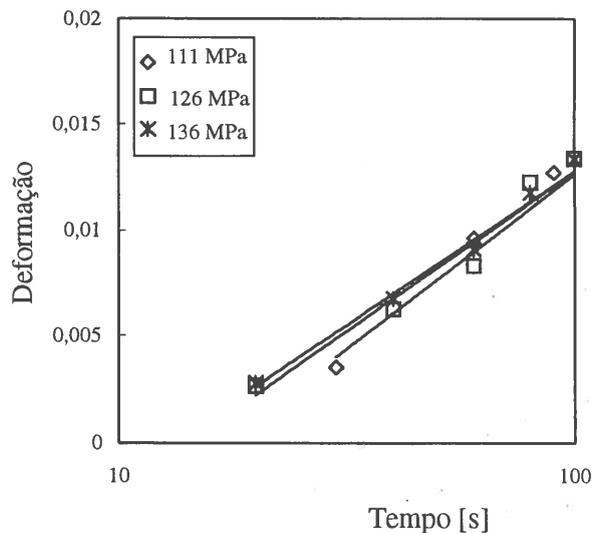
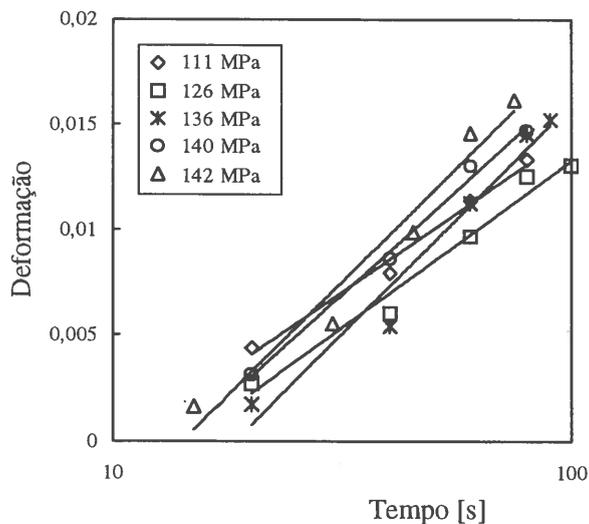


Figura 5 – Curvas deformação-tempo na fluência primária dos laminados: a) direção T; b) direção L.

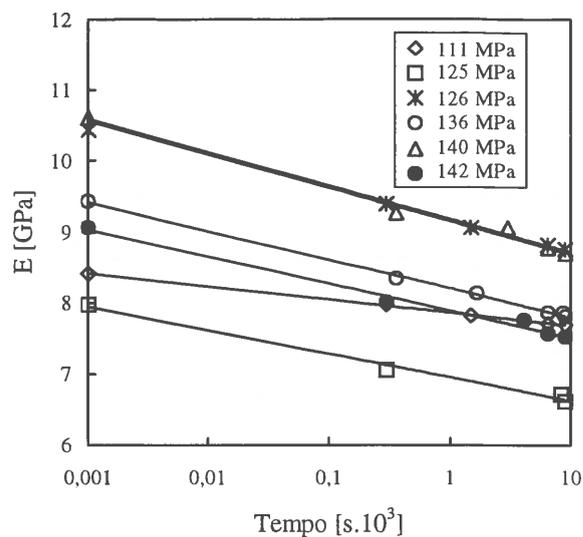
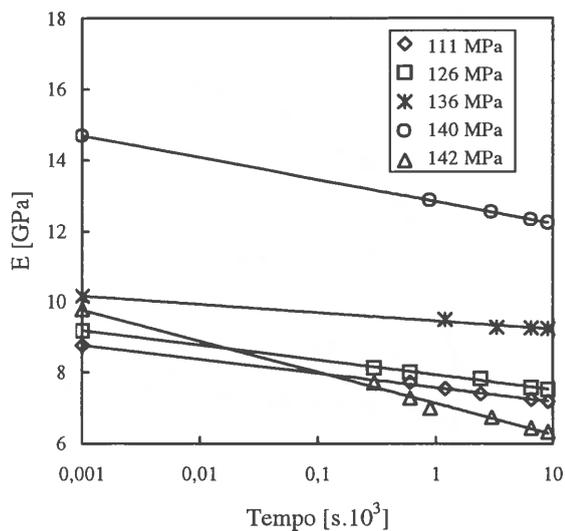


Figura 7 – Curvas E -tempo para os laminados: a) direcção T; b) direcção L.

logarítmica

ϵ_0 = intercepção da linha de fluência secundária com o eixo de deformação

K = taxa de fluência secundária

t = tempo em segundos

Os parâmetros de fluência obtidos para os laminados e os painéis são apresentados na tabela 1, considerando o tempo em segundos e a tensão em MPa.

Os valores do módulo de Young foram determinados a partir das curvas de tensão em função da deformação obtidas para determinados incrementos de tempo. Para cada um destes incrementos foi feita uma descarga parcial do provete e foram registados no computador os valores da carga e do deslocamento (deflexão). Usando software apropriado calcularam-se as tensões e as deformações e foi estabelecida uma recta de regressão linear entre a tensão e a deformação. O módulo de Young E foi considerado igual à inclinação desta curva de regressão. Tal como é referido na literatura [Lowe et al, 1994; Johnson, 1987] o valor de E decresce com o tempo, tanto no painel como no laminado. Na figura 7a) e

7b) mostra-se a variação de E com o tempo nos laminados para as direcções T e L, respectivamente. A dependência de E em relação ao tempo é particularmente importante numa região inicial que compreende a fluência primária e o regime de transição da fluência primária para a secundária. Depois desta região as curvas são quase lineares com uma inclinação muito pequena e muito semelhante para as duas direcções de carga a vários níveis de carga.

A relação entre E e o tempo nos regimes primário e secundário da fluência, para ser modelado pela equação

$$E = B \log t + C$$

Em que B e C são os coeficientes de regressão linear em função do logaritmo do tempo. Os valores destas constantes são indicadas na tabela 1.

Tabela 1 – Dados da fluência à temperatura ambiente

Provete	Tensão(MPa)	A	n	ϵ_0	K	B	C
Laminado/T2	111	-0.0156	.0153	.0139	1E-8	-183.7	8415
Laminado/T4	126	-0.0183	.0159	.0139	9E-9	-424.1	10434
Laminado/T5	140	-0.0219	.0191	.0151	1E-8	-471.8	10570
Laminado/T6	136	-0.0198	.019	.0163	1E-8	-408.0	9412
Laminado/T7	142	-0.0249	.0222	.0175	1E-8	-385.3	9030
Laminado/T8	125	-	-	-	-	-335.0	7944
Laminado/T2	132	-	-	.0133	2E-9	-616.8	14667
Laminado/L3	120	-	-	-	-	-235.9	10158
Laminado/L5	138	-	-	-	-	-883.0	9870
Laminado/L7	114	-0.0174	.0151	.0139	1E-7	-416.2	9170
Laminado/L8	106	-0.0204	.0161	.0141	1E-8	-385.9	8766
Laminado/L6	138	-0.0163	.0145	.0153	3E-6	-	-
Painel/L2	24.2	0.0054	0.000233	.0068	3.4E-9	-	-
Painel/L4	26.6	0.0063	0.000684	.0104	2.5E-8	-	-
Painel/T3	24.2	0.0056	0.000412	.0085	6.8E-9	-	-
Painel/T6	26.6	0.0059	0.000834	.0013	3.3E-8	-	-

CONCLUSÕES

1 - À temperatura ambiente, tanto nos painéis como nos laminados, as curvas de deformação-tempo apresentam dois estágios de fluência. O primeiro estágio é muito curto nos laminados, enquanto que nos painéis se prolonga por um período bastante mais elevado (até cerca de 8000 segundos).

2 - No regime secundário a variação da deformação com o tempo é praticamente linear. A taxa de variação de deformação é muito mais elevada nos painéis à flexão do que nos laminados em tracção.

3 - Entre os dois regimes ocorre uma zona de transição em que a relação entre a deformação e o tempo é não linear. Este período é muito curto ($\cong 100$ s) nos laminados, mas é bastante longo (20000 a 50000 s) nos painéis. Esta diferença de comportamento sugere que a fluência dos painéis é essencialmente condicionada pelo comportamento da espuma.

4 - Nos laminados o gradiente de E , para uma tensão constante, é elevado numa fase

inicial relativamente curta (menor que 1000 segundos). No regime secundário a variação de E com o tempo é quase linear, com uma taxa de variação muito baixa e muito semelhante para as duas direcções de carga e diferentes níveis de tensão.

REFERÊNCIAS

Gilchrist, M. D., Kinloch, A. J., Mathews, F. L. and Osiyemi, S. O.: Fatigue Performance of Composite Structural I-Beams. *Proc. 6th European Conference on Composite Materials*, Bordeaux, France, 1993, pp. 397-402.

Rothschild, Y., Echtermeyer, A.T. and Arnesen, A.: Modelling of the Non-linear Material Behaviour of Cellular Sandwich Foam Core. *Composites*, Volume 25, No. 2, 1994, pp.111-117.

Gibson, L.J., Ashby, M.F., Zang, J. and Triantafillou, T.C.: Failure Surfaces for Cellular Materials Under Multiaxial Loads-I Modelling. *Int. J. Mech. Science*, Volume 31, No. 9, 1989, pp.635-663.

Little, R. E., Mitchell, W. J. and Mallick, P. K.: Tensile Creep and Creep Rupture of Continuous Strand Mat Polypropylene Composites. *J. of Comp. Materials*, Vol. 29, N° 16, 1995, pp. 2215-2227.

Lowe, A. C., Moore, D. R. and Robinson, I. M.: Data for Designing with Continuous-Glass-Fibre-Reinforced Polypropylene. *Comp. Science and Techn.*, Vol. 52, 1994, pp. 205-216.

Shigley, J. E. and Mitchell, L. D.: Mechanical Engineering Design. *McGraw-Hill*, Int. Book Company, 1983.

Johnson, A.F. and Sims, G.D.: *Design Procedures for Plastic Panels*. National Physical Laboratory Report, 1987.