

ESTUDO DO COMPORTAMENTO À FLUÊNCIA E PREDIÇÃO DE VIDA EM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO E RESINA EPOXÍDICA

Cassius Riul⁽¹⁾, Gerson Marinucci^(1,2)

⁽¹⁾Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo - CTMSP, Brasil

⁽²⁾Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEN, Brasil

Resumo

Compósitos de fibra de carbono e resinas epoxídicas são amplamente usados em áreas que demandam elevadas propriedades mecânicas aliadas a um baixo peso específico, como nas indústrias aeroespacial e petrolífera. O empilhamento de camadas com diferentes direcionamentos das fibras no desenvolvimento de componentes estruturais busca configurações adequadas à direção de solicitação que a estrutura estará sujeita. O não alinhamento das fibras de uma camada com a direção de carregamento pode acarretar em fluência da lâmina, comprometendo a integridade estrutural do compósito. Neste trabalho foi estudada a fluência em camadas de fibras de carbono e resina epoxídica com fibras orientadas a 65° com a direção de solicitação, por ensaios de tração de longa duração com carga constante. Os ensaios foram realizados a diferentes temperaturas e por meio da técnica de superposição tempo-temperatura foram calculadas curvas de predição de vida. Os resultados evidenciaram a fluência e sua alta dependência com a temperatura.

Palavras-chave: compósitos, fibra de carbono, fluência, predição de vida.

INTRODUÇÃO

Materiais compósitos poliméricos que utilizam fibra de carbono como reforço possuem elevadas propriedades mecânicas em função de sua massa específica e são menos susceptíveis à corrosão quando comparados aos materiais convencionais, tais como os metais (CALLISTER, 2007). Estas e outras características tornam este tipo de material uma alternativa muito importante para a indústria em geral e, principalmente para as indústrias aeronáutica, automobilística, naval e petroquímica (GAY, 2003). Estas indústrias desenvolvem compósitos poliméricos estruturais de alto desempenho, utilizados na fabricação de componentes que necessitam de alta confiabilidade. A garantia da integridade destes componentes estruturais demanda uma ampla caracterização dos compósitos, incluindo o estudo do comportamento mecânico dependente do tempo, devido à sua resposta viscoelástica e às inúmeras possibilidades de configurações de fabricação.

A fluência é uma deformação ao longo do tempo de um material submetido a uma carga ou tensão constante e estabelece uma dependência com o tempo, o nível de tensão aplicada, a temperatura e em compósitos dependem também da direção das fibras (MALLICK, 1993). Este trabalho foi idealizado e executado tendo como objetivo a caracterização viscoelástica de compósitos poliméricos por meio de ensaios de fluência sob carregamento constante em tração, além da aplicação de modelo de predição de vida pelo princípio da superposição tempo-temperatura.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do presente estudo foram fabricados corpos-de-prova (CPs) de fibra de carbono e resina epoxídica, em configuração *off-axis*, com ângulo entre a direção das fibras e a direção de solitação (direção de ensaio) de 65°. As matérias primas utilizadas foram: resina epoxídica do tipo éter diglicidílico de bisfenol A, LY556, endurecedor à base de anidrido metiltetrahidroftálico HY917, acelerador de amina terciária benzildimetilamina DY062 da empresa Huntsman e fibra de carbono T300 HT 6K da empresa Tenax. Os CPs foram cortados a partir de placas fabricadas pela técnica de enrolamento filamentar (*filament winding*) em mandril paralelepípedo, seguido de prensagem com contra molde e cura em estufa. A Fig. (1) mostra a sequência de fabricação, corte e colagem dos extensômetros nos CPs, que foram fabricados de acordo com a norma ASTM D3039/3030M – 95a.

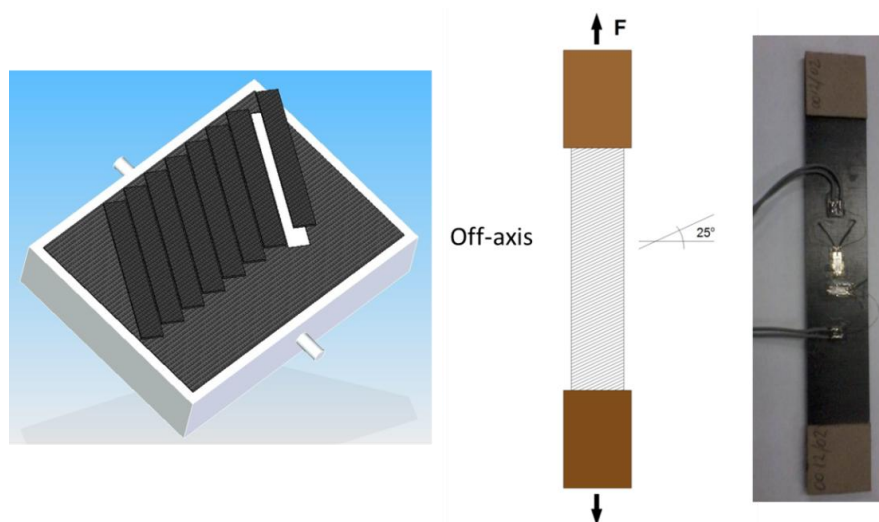


Figura 1 – Sequência de fabricação, corte e colagem dos extensômetros nos CPs.

Para a realização dos ensaios foram usados quatro equipamentos de ensaio do tipo braço de alavanca, como ilustra a Fig. 2 (FARINA, 2009). O equipamento conta com um envoltório termicamente isolado, no qual fica localizado o CP. Este envoltório possui resistências elétricas e as temperaturas são reguladas por

controladores de temperatura ligados a termopares que ficam encostados nos CPs. Pelo monitoramento da temperatura interna, foi verificando uma variação menor que 1°C na região onde são colocados os CPs.

Todo o monitoramento da deformação dos CPs é realizado por processo de extensometria. O sistema de aquisição dos dados dos extensômetros é feito por placa da marca Lynx, acoplada a um computador, onde é executado o software de aquisição de dados, AqDados, da própria Lynx.

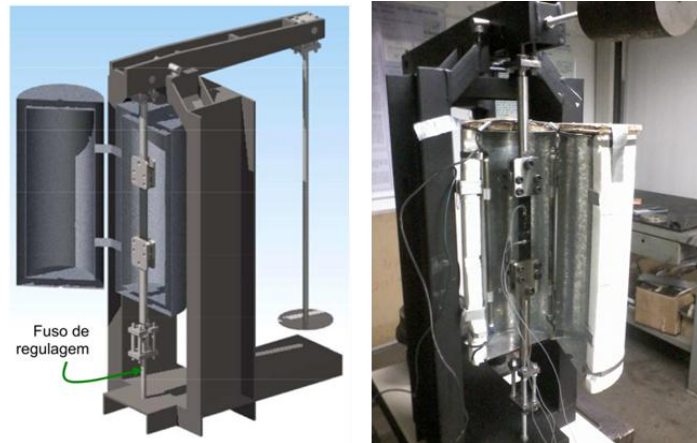


Figura 2 – Máquina de ensaio de fluência: sistema de braço de alavanca com garras no interior de um forno (modificado de FARINA, 2009).

Para a obtenção das curvas de predição de vida foi aplicado o princípio da superposição tempo-temperatura (YEN, 1985 ; MALLICK, 1993) em ensaio de fluência, simulando o envelhecimento do compósito. Para isso foram executados ensaios com o mesmo valor de tensão e diferentes temperaturas. Esta técnica se baseia no fato de que ensaios de fluência realizados a diferentes temperaturas podem compor curvas de predição de vida.

As curvas de fluência de temperaturas superiores e inferiores às da temperatura em que se deseja saber o comportamento do material, tem seu módulo transformado pela eq. (A) e sofrem um deslocamento no tempo pela eq. (B). O índice 0 nas equações se refere à temperatura de referência, base na qual as demais curvas (índice 1) se juntarão. Nas equações E é o módulo de elasticidade, ρ a densidade, t o tempo e T a temperatura.

$$E(t, T_0) = \frac{\rho_1 T_1}{\rho_0 T_0} E(t_1, T_1) \quad (\text{A}), \quad t = (\alpha_T |_{at T=T_1}) t_1 \quad (\text{B}) \quad (\text{YEN, 1985}).$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente foram realizados ensaios com diferentes temperaturas para que se pudesse estabelecer como se dá a variação da deformação sob tensão com a temperatura de ensaio. O gráfico da Fig. (3) mostra uma sensível variação da deformação com pequenos aumentos na temperatura. A maior resistência mecânica nos compósitos poliméricos fibrados ocorre quando o carregamento é realizado na direção longitudinal destas fibras. Esta resistência diminui gradativamente, quanto mais inclinada em relação à aplicação do esforço estiver a fibra, sendo que a 90° a resistência é mínima. Neste estudo as fibras estão orientada a 65° em relação a direção de carregamento, o que cria uma dependência muito grande da resposta mecânica com relação à matriz polimérica e isso explica a alta sensibilidade mecânica do material com a temperatura. Num cenário em que as fibras fossem colocadas na direção longitudinal, praticamente não ocorreria fluência.

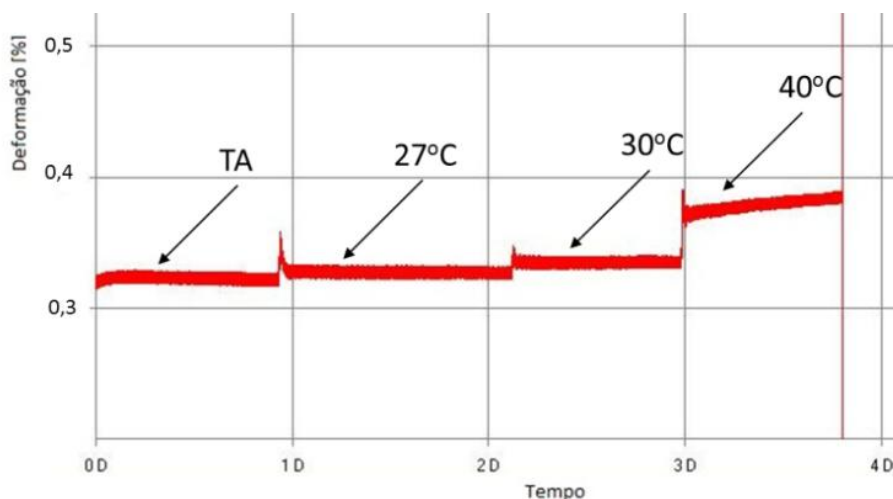


Figura 3 – Variação da deformação com o aumento da temperatura.

Foram realizados três ensaios quasi-estáticos em CPs com configuração igual aos de ensaio de fluência, visando a obtenção da tensão de ruptura à temperatura ambiente. Foi obtido uma tensão de ruptura média de 84 MPa. A partir deste valor e pela comparação com os resultados obtidos por FARINA (2009) – de ensaios quasi-estáticos à temperaturas mais elevadas – foi possível estimar a tensão de ruptura à temperatura de 70°C, como sendo de 70 MPa. Esta temperatura foi escolhida para a análise de predição de vida a partir de ensaios de fluência realizados com 40% da tensão de ruptura, ou seja, 28 MPa.

A Fig. (4) mostra os ensaios realizados a 28 MPa da carga de ruptura em quatro temperaturas diferentes 70, 75, 80 e 82°C. A partir destes ensaios foi possível constatar novamente uma grande dependência da fluência e da ruptura sob fluência com a temperatura.

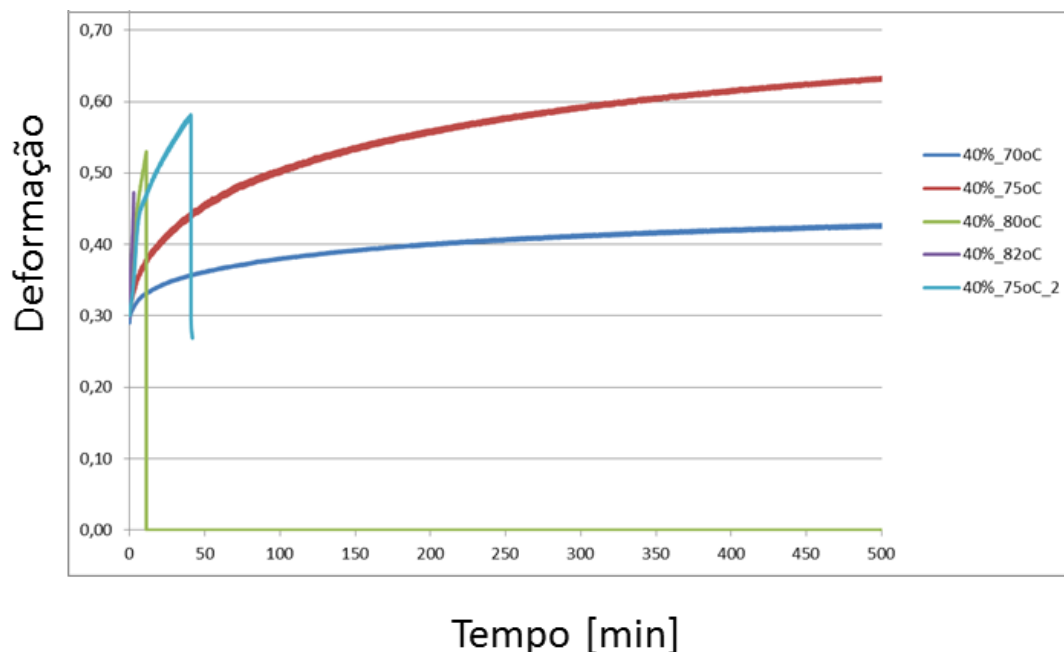


Figura 4 – Curvas de deformação em função do tempo em ensaio de longa duração.

Houve fluência acelerada do material ensaiado a 80 e 82°C, sendo que o CP ensaiado a 80°C quebrou em menos de 12 min e o de 82°C em tempo ainda mais curto. No CP ensaiado a 75°C a velocidade de deformação foi mais lenta do que a observada para o CP de 80°C, sendo que a ruptura ocorreu duas semanas após o início do ensaio. O ensaio a 70°C teve uma duração de três meses, com velocidade de deformação ainda mais lenta que a dos dois primeiros ensaios. Sua interrupção não se deu em decorrência da fluência, mas sim por falha do adesivo de colagem dos *tabs* (onde as garras se prendem), devido ao longo tempo de exposição à alta temperatura a que foi submetido.

A repetição do ensaio à temperatura de 75°C foi realizada em mesmo equipamento para excluir a possibilidade de diferentes condições de ensaio. Apesar da velocidade de deformação dos ensaios terem se mostrado coerentes com a dos primeiros ensaios, o CP ensaiado a 75°C_2 (Fig. 4) se rompeu antes do previsto, devido provavelmente a uma concentração de tensão dada pelo aperto excessivo da garra.

A Fig. (5) mostra três curvas úteis para o cálculo da curva de predição de vida, do módulo de elasticidade em função do logaritmo do tempo. A curva de 82°C não foi gerada, devido ao curto tempo de ensaio esta curva não forneceu dados suficientes para compor a curva de predição de vida.

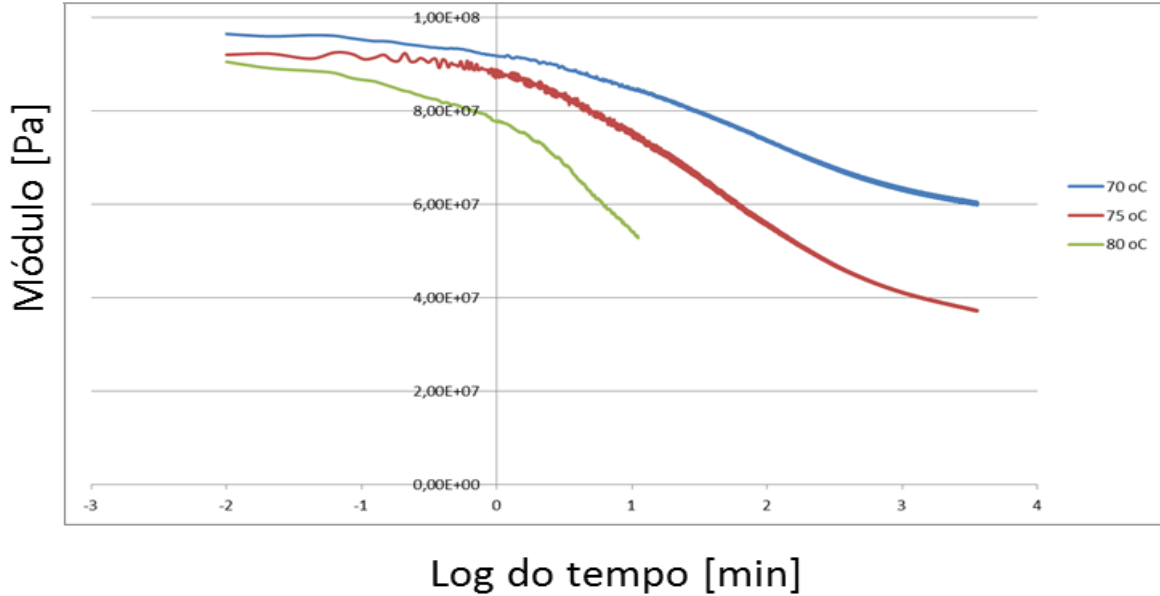


Figura 5 – Curvas de módulo de elasticidade em função do logaritmo do tempo em ensaio de longa duração.

A Fig. (6) mostra o deslocamento das curvas de fluência de acordo com ajuste dado pelas Eqs. (A e B).

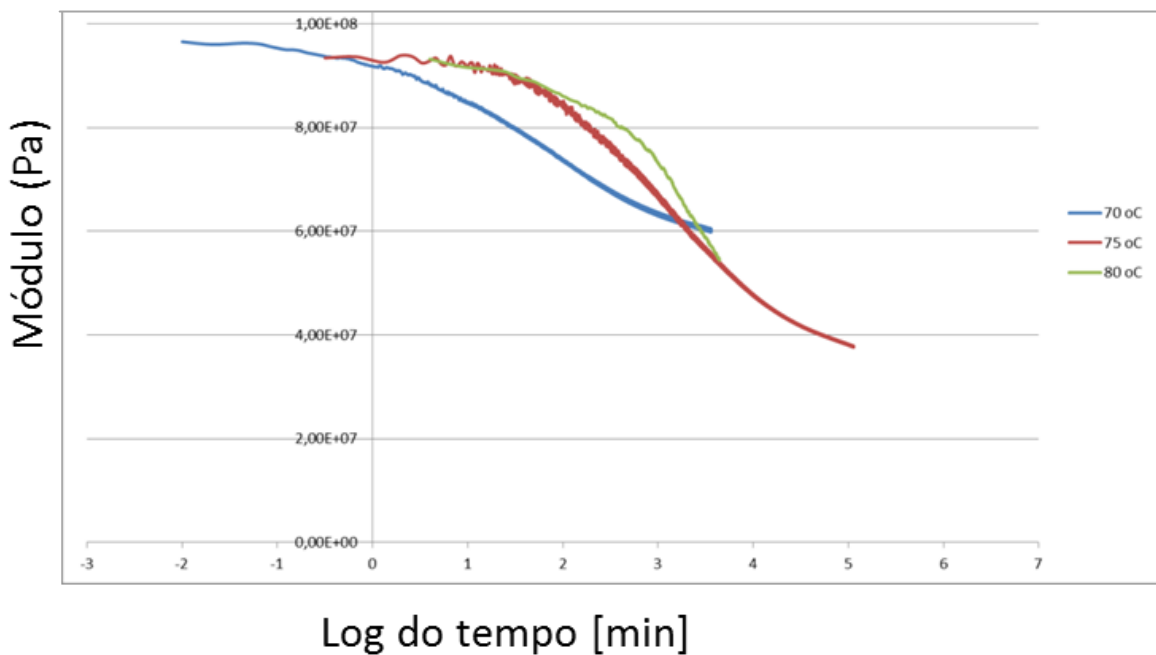


Figura 6 – Curvas de módulo de elasticidade em função do logaritmo do tempo deslocadas em cálculo equivalente de módulo e tempo.

É possível visualizar o deslocamento das curvas de maneira a compor a curva de predição de vida do material com tensão aplicada de 28 MPa em temperatura de 70°C. A curva de predição de vida de acordo com cálculos efetuados é mostrada na Fig. (7).

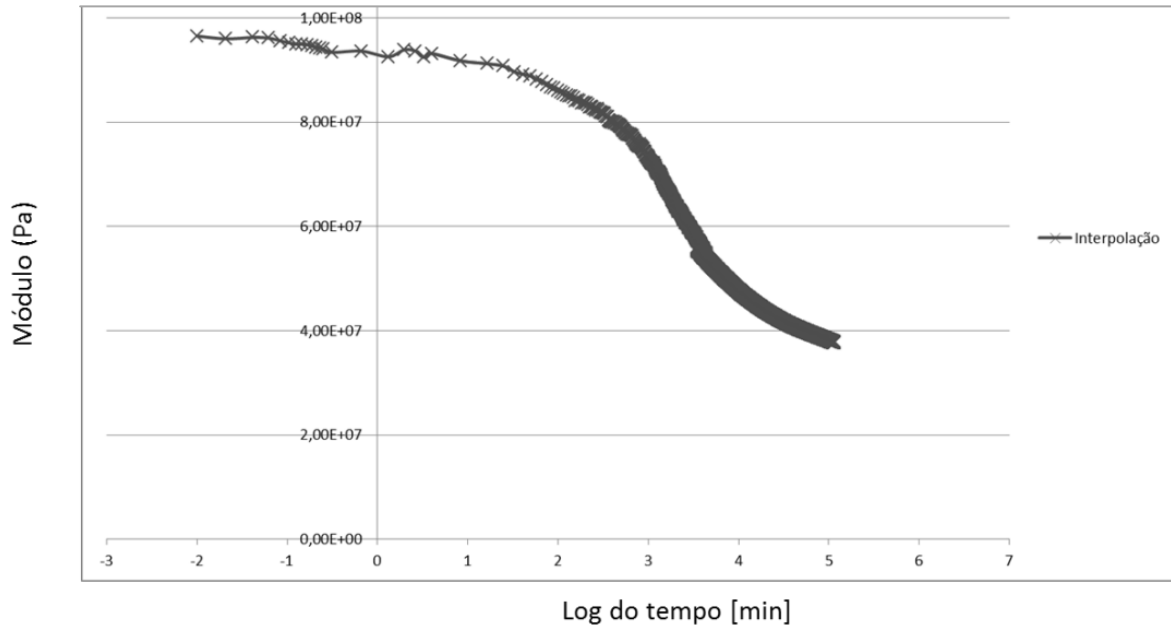


Figura 7 – Curvas de módulo de elasticidade em função do logaritmo do tempo deslçadas em cálculo equivalente de módulo e tempo.

CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios mostraram uma dependência muito grande de resposta em relação a temperatura de ensaio. Os CPs ensaiados se romperam facilmente à temperaturas maiores que 80°C, sendo impossível uma extrapolação maior da curva. No entanto, é possível concluir que o compósito ensaiado, na configuração proposta no estudo, sofre fluência significativa em curto tempo, sendo que seu módulo de elasticidade apresenta queda de uma ordem de grandeza em menos de 100 dias com um carregamento de 40% da tensão de ruptura em ensaio quasi-estático. A tensão usada no ensaio (40% da tensão de ruptura a 70°C) se mostrou demasiada para se gerar uma curva de predição de vida mais rica para a temperatura de 70°C.

REFERÊNCIAS

1. CALLISTER, W. D.; DAVID, G. R. ***Materials science and engineering: an introduction***. Wiley: New York, 2007.
2. FARINA, L. C. ***Caracterização viscoelástica por meio de ensaios de fluência e ruptura por fluência de compósitos poliméricos de matriz de resina epoxídica e fibra de carbono***. 2009. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/CNEN-SP, São Paulo.
3. GAY, D. ***Composite Materials: Design and Applications***. [S.l.]: CRC Press, 2003.
4. MALLICK, P. K. ***Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design***. CRC press, 1993.
5. YEN, S. C.; MORRIS, D. H. Accelerated Characterization of the Creep Behavior of SMC-R 50. RP/C'85(Reinforced Plastics/Composites), 40 th Annual Conference. 1985.

STUDY OF CREEP BEHAVIOR AND PREDICTION OF LIFE OF CARBON FIBER-REINFORCED EPOXY RESIN

Abstract

Carbon fiber-reinforced epoxy have been widely used by various industrial areas such as aerospace and petroleum industries. These areas require high mechanical properties combined with a low specific weight in the development of structural components. The stack of layers with different fiber directions seeks to obtain appropriate settings concerning the direction to which the structure will be subjected. The non-alignment of the fibers in a layer with the direction of loading can lead to creep in these layers, compromising the structural integrity of the composite. In this work the creep was studied in layers of carbon fiber-reinforced epoxy resin with the fibers 65° oriented with the request direction, for long-term tensile tests with a constant load. Creep tests were performed under different temperatures. The life prediction was calculated using the principle of time-temperature superposition. The results showed the occurrence of creep and its high dependence with temperature.

Keywords: composites, carbon fiber, creep, life prediction.