

# Efeito da Degradação Ambiental nas Propriedades de Cisalhamento de Compósitos PPS/Fibra de Carbono

Anahi P. Costa, Edson C. Botelho  
Departamento de Materiais e Tecnologia, UNESP

Luiz C. Pardini  
Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial, IAE

**Resumo:** Os compósitos termoplásticos avançados são uma alternativa a compósitos termorrígidos em algumas aplicações aeronáuticas, devido a ganhos em propriedades. Dentre as matrizes termoplásticas, o PPS (poli sulfeto de fenileno) destaca-se devido às suas características estruturais. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do condicionamento ambiental sobre o comportamento de resistência ao cisalhamento de PPS / fibras de carbono. Por esta razão, amostras deste material foram condicionadas em solução salina, em banho higrotérmico e sob radiação UV. Após estes condicionamentos os corpos-de-prova foram avaliados quanto a sua resistência aos cisalhamentos interlaminar (ILSS) e Iosipescu e os resultados obtidos foram comparados. Quando comparado ao valor de cisalhamento interlaminar obtido do compósito não-climatizado ( $58,4 \pm 1,9$  MPa), os valores de cisalhamento interlaminar ILSS decaíram em torno de 14 e 3%, respectivamente, após banho higrotérmico e banho salino. Sob condicionamento por radiação UV houve um decréscimo de 2% após exposição por 300 horas, 11% após 600 horas e 9% após 900 horas. Já o laminado ensaiado pelo método Iosipescu teve uma tensão de cisalhamento no plano de  $109,2 \pm 0,4$  MPa. Com condicionamentos, teve um decréscimo de 6% após banho higrotérmico e 12% após banho salino. A exposição à radiação UV provocou na resistência de cisalhamento no plano um decaimento de 6% para o condicionamento de 300 horas, 10% para o condicionamento de 600 horas e 14% para o condicionamento por 900 horas.

**Palavras-chave:** *Poli sulfeto de fenileno (PPS), fibra de carbono, propriedades de cisalhamento, compósito termoplásticos, condicionamento ambiental.*

## Effect of Environmental Degradation on Shear Properties of PPS /Carbon Fiber Composites

**Abstract:** Advanced thermoplastic composites are an alternative to thermoset composites in many aeronautical applications owing to their superior properties. Among the thermoplastic matrix, PPS (poly phenylene sulfide) stands out due to its structural characteristics. The objective of this study is to evaluate the influence of environmental conditioning on the shear behavior of PPS / carbon fiber composites. Samples of this material have been conditioned in saline water solution, in hygrothermal conditioning and under UV radiation. After conditionings the specimens were evaluated by interlaminar shear strength (ILSS) and Iosipescu shear test methods. The environmental conditioning reduced the interlaminar shear stress (ILSS) of conditioned composites in comparison with non-conditioned composites tested with the same method ( $58.4 \pm 1.9$  MPa). The ILSS decreased by ca. 14 and 3%, respectively, after hygrothermal conditioning and saline water solution. Moreover, the values of interlaminar shear stress under UV radiation decreased by 2, 11 and 9% after exposure times of 300, 600 and 900 hours, respectively. The non-conditioned composites tested with the Iosipescu method ( $109.2 \pm 0.4$  MPa ) also had ILSS decreasing with environmental conditioning: the values decreased 6% after hygrothermal conditioning and 12% after saline water solution. The UV radiation exposure led to a decrease of 6, 10 and 14% following exposures during 300, 600 and 900 hours, respectively.

**Keywords:** *Poly phenylene sulfide (PPS), carbon fiber, shear properties, thermoplastic composite, environmental conditioning.*

## Introdução

Nos últimos anos, compósitos termoplásticos reforçados com fibras contínuas vem sendo desenvolvidos como uma alternativa aos compósitos termorrígidos em uma ampla variedade de aplicações desde as comerciais, com baixo custo envolvido, até as de engenharia, com maior valor agregado<sup>[1,2]</sup>. Esta crescente utilização deve-se a vantagens tais como: maior tempo de armazenagem da matéria prima, facilidade de reparo ou possibilidade de reciclagem, que os compósitos termoplásticos apresentam quando confrontados com os compósitos termorrígidos, tradicionalmente utilizados na indústria aeroespacial<sup>[1-4]</sup>.

Dentre as matrizes termoplásticas utilizadas em compósitos de aplicações estruturais, o poli (sulfeto de fenileno) (PPS) é um termoplástico de engenharia especial, ou seja, um polímero cuja estrutura é composta por anéis aromáticos, que intercalados

a átomos de enxofre, impõem restrições à movimentação da cadeia polimérica. Esta estruturação resulta em uma cadeia homopolimérica linear, com uma elevada cristalinidade entre 50 e 60% e que permite sua aplicação em elevadas temperaturas, devido o baixo coeficiente de dilatação térmica e alta resistência ao fogo, além de resistir a ataques químicos de solventes orgânicos, inorgânicos, sais e bases<sup>[3-10]</sup>.

Durante condições operacionais, componentes em compósitos poliméricos são normalmente expostos a tensões mecânicas e ataques ambientais de agentes externos responsáveis pela perda de propriedades mecânicas. Por exemplo, em compósitos termoplásticos a presença de umidade pode induzir degradação hidrolítica das cadeias poliméricas, a formação de ligações cruzadas e a plasticização da matriz<sup>[1-4,11-14]</sup>.

**Autor para correspondência:** Anahi P. Costa, Departamento de Materiais e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus de Guaratinguetá, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, CEP 12516-410, Guaratinguetá, SP, Brasil. E-mail: anahi.dacosta@gmail.com

Os efeitos ambientais causados pela temperatura e umidade relativa do ar podem ser reversíveis, quando o período de exposição é de curta duração ou irreversíveis, quando a exposição ocorre em ciclos prolongados. Um tempo maior de exposição favorece a interação da água com grupos funcionais específicos de matrizes poliméricas de natureza polar<sup>[3]</sup>. A absorção de água e a exposição à salinidade também causam alterações no material, em geral, provocando uma diminuição nos valores das propriedades mecânicas dos compósitos, sendo este efeito atribuído, em parte, à degradação da interface fibra/matriz polimérica.

Em particular, existem dúvidas sobre como a água é absorvida pelo compósito. Uma das hipóteses é que a água seja absorvida preferencialmente ao longo da interface fibra/matriz<sup>[12,14]</sup>. Embora a natureza da matriz (principalmente a sua polaridade) seja um fator dominante no processo de absorção, tipo e orientação das fibras, seqüência de empilhamento das camadas e acabamento da borda livre do laminado podem influenciar no processo de difusão da umidade no compósito. Já a exposição à radiação ultravioleta (UV) pode produzir mudanças consideráveis na estrutura de materiais poliméricos. Dependendo do tipo de radiação UV, da intensidade e da quantidade de oxigênio no local da absorção, podem ocorrer rompimentos de ligações na cadeia principal<sup>[3,12,14]</sup>.

A determinação da resistência ao cisalhamento de materiais compósitos avançados é um parâmetro extremamente importante em projetos de estruturas, pois a falha por cisalhamento impede, por exemplo, a fabricação de grandes componentes estruturais primários utilizados pela indústria aeronáutica<sup>[15]</sup>. Além disso, os ensaios de cisalhamento são os mais adequados para avaliar eventuais problemas interfaciais resultantes do efeito do intemperismo, pois as propriedades em cisalhamento são diretamente influenciadas pelas propriedades da matriz. No entanto, tal determinação é dificultada pela natureza anisotrópica dos laminados poliméricos, já que a resposta ao esforço não é igual em todas as direções do material. Um teste de cisalhamento deve provocar uma área de cisalhamento puro e uniforme, fornecer uma resposta confiável de tensão e deformação e possuir um modo de falha cisalhante ou pelo menos apresentar deformação plástica e delaminação evidente<sup>[16,17]</sup>.

A literatura disponível propõe diferentes métodos para compreender as propriedades de cisalhamento de compósitos. Um dos métodos mais utilizados é o ensaio de três pontos (ou ILSS) por proporcionar economia de matéria-prima e facilidade de obtenção do corpo-de-prova, além de fornecer uma resposta qualitativa da resistência ao cisalhamento interlaminar do compósito. Outro teste denominado Iosipescu vem se mostrando como o mais adequado, uma vez que proporciona um estado puro de tensão de cisalhamento entre os entalhes da amostra e assim a possibilidade de medida do módulo de cisalhamento, a partir da colagem de extensômetros elétricos no corpo-de-prova<sup>[18-20]</sup>.

Dentro desse contexto, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito ambiental nas propriedades de cisalhamento do compósito PPS/fibra de carbono. Para esse propósito, amostras foram divididas em lotes e expostas a diferentes condicionamentos: radiação ultravioleta, banho higrotérmico e banho salino. Após às exposições, os corpos de prova condicionados foram ensaiados pelos métodos de cisalhamento Iosipescu e ILSS e os resultados comparados com aqueles não condicionados.

## Material e Metodologia Experimental

### Material

O material utilizado neste trabalho compreende um compósito de fibra de carbono e matriz termoplástica de poli (sulfeto de fenileno), como apresentado na Figura 1, fornecido pela empresa holandesa Ten Cate. Sua configuração consiste de um laminado

com 2,3 mm de espessura reforçado com fibra de carbono tecida na configuração 8HS.

### Metodologia experimental

Para avaliar a qualidade estrutural do material, amostras de PPS/fibra de carbono foram caracterizadas por microscopia óptica, obtendo-se informações sobre o padrão de qualidade dos laminados quanto à infiltração da matriz nas fibras de reforço, porosidade, orientação e compactação das camadas. Para esta finalidade, o microscópio utilizado foi o Microscópio Óptico (MO) NIKON, modelo EPIPHOT 200, disponível no Laboratório de imagens (LAIMAT) da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – Unesp. Os ensaios de microscopia óptica também foram realizados após a realização dos ensaios de cisalhamento, com o intuito de se avaliar os modos de falhas dos compósitos condicionados e não-condicionados.

Com o objetivo de avaliar a porcentagem volumétrica do reforço, neste trabalho foram realizados ensaios por digestão ácida, utilizando-se o procedimento B do Método 1 presente na Norma ASTM D3171. A partir desse método, o conteúdo de matriz foi removido fisicamente do compósito em uma solução aquecida de ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio. O resíduo da digestão ácida, contendo o reforço em fibra de carbono não dissolvido, foi filtrado, lavado, seco e pesado. A porcentagem em volume do reforço ( $V_r$ ) foi calculada, conhecendo-se a massa específica da matriz e da fibra, como indicado na Equação 1, onde  $M_f$  é a massa final do resíduo da digestão;  $M_i$  a massa inicial do material,  $\rho_c$  é massa específica do compósito, definida pela regra da mistura, e  $\rho_r$  é a massa específica do resíduo da digestão (reforço do compósito).

$$V_r = \left( \frac{M_f}{M_i} \right) \times 100 \times \frac{\rho_c}{\rho_r} \quad (1)$$

A análise termogravimétrica foi realizada no analisador térmico (Perkin Elmer, modelo TGA-7) disponível na Divisão de Materiais do CTA. De modo a averiguar as propriedades de degradação térmica do material e a comprovação do teor volumétrico. Esta análise foi realizada pelo método dinâmico, utilizando uma razão de aquecimento de 10 °C/min, em atmosfera controlada de gás de  $N_2$  (20 mL/min) e uma massa aproximada de 15 mg.

### Condicionamento ambiental

O condicionamento higrotérmico foi realizado pela imersão dos corpos-de-prova em banhos de água destilada com temperatura controlada a 80 °C por 2 meses de condicionamento. Primeiramente as amostras foram secas em um forno a vácuo aquecido a 60 °C por 48 horas com o intuito de eliminar o máximo possível da umidade presente no material como fornecido e então pesadas para se conhecer a massa inicial da amostra a seco. Após esta primeira etapa, as amostras foram imersas em um banho termostatizado contendo água destilada, sendo estas pesadas duas vezes na semana. Após este tempo, os corpos-de-prova foram avaliados a partir dos ensaios de cisalhamento ILSS e Iosipescu.

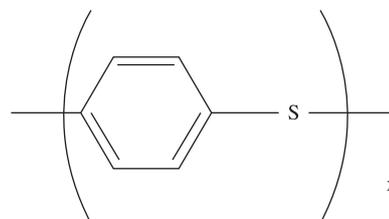


Figura 1. Estrutura de repetição do Poli sulfeto de fenileno<sup>[4]</sup>.

A partir da massa da amostra pode-se obter o teor de umidade absorvido pelo material ao longo do tempo de imersão de acordo com a Equação 2, sendo:  $M_a$  a massa do material após absorção e  $M_i$  a massa inicial do compósito a seco.

$$M, \%_{umidade} = \left( \frac{M_a - M_i}{M_i} \right) \times 100 \quad (2)$$

O condicionamento salino teve por objetivo a determinação da influência da salinidade de meios marítimos em amostras de compósito diretamente em contato com a água do mar. Primeiramente, preparou-se uma solução salina inorgânica ausente de metais pesados simulando a composição química da água do oceano, tal como descrito na norma ASTM D 11441-98.

O procedimento de imersão utilizou condições semelhantes ao do condicionamento higrotérmico, exceto que o banho ocorreu em temperatura ambiente por aproximadamente um mês, até ser atingido o equilíbrio de absorção de umidade. Após este tempo, os corpos-de-prova foram avaliados a partir dos ensaios de cisalhamento ILSS e Iosipescu.

A reprodução de intemperismos como irradiação solar, chuva e orvalho foi possível a partir da exposição do material em câmara de condicionamento ambiental da empresa QUV/Se (Q-Panel Lab Products, Cleveland, Ohio). Nesta câmara, vapor de água foi gerado a partir de um banho aquecido e a emissão de radiação UV-B (com comprimento de onda entre 295 a 365 nm) por oito lâmpadas fluorescentes. A metodologia de condicionamento foi determinada pela norma ASTM G154, onde o material ficou exposto durante oito horas sob irradiação de luz e oito horas sob condensação de água proveniente do vapor gerado.

O condicionamento ambiental foi realizado em quinze corpos-de-prova para cada ensaio mecânico divididos em três diferentes tempos de exposição: 300, 600 e 900 horas de exposição. Durante a exposição, amostras foram pesadas semanalmente, com o intuito de verificar a degradação do material em até 900 horas de exposição. Após cada tempo de exposição, os corpos-de-prova foram também avaliados a partir dos ensaios de cisalhamento ILSS e Iosipescu.

### Propriedades de cisalhamento

O ensaio de ILSS determina tensão de cisalhamento interlaminar de compósitos reforçados com fibras de alto módulo e é conduzido com base na norma ASTM D2344. Neste trabalho, os ensaios de ILSS foram realizados a uma velocidade de 0,5 mm/min, utilizando uma célula de carga de 500 kgf. A partir deste ensaio foi determinada a tensão máxima de cisalhamento do laminado, segundo a Equação 3, onde  $F_{sbs}$  é a tensão máxima de cisalhamento interlaminar em MPa;  $P_m$  é o carregamento máximo observado durante o ensaio em N;  $b$  é a largura do corpo-de-prova em mm e  $h$  é a espessura do corpo-de-prova, também em mm.

$$F_{sbs} = 0,75 \times \frac{P_m}{(b \times h)} \quad (3)$$

Já o modo de cisalhamento no plano, com orientação dos planos de 1-2 e 2-1, foi determinado para o material pelo método de cisalhamento Iosipescu. O ensaio foi conduzido seguindo a norma ASTM D5379. A tensão máxima de cisalhamento no plano obtida foi determinada pela Equação 4, onde:  $F_u$  é a tensão máxima de cisalhamento, em MPa;  $P_m$  é o carregamento máximo observado durante o ensaio, em N e  $A$  é a área da secção transversal na região do entalhe, dada em mm<sup>2</sup>[21].

$$F_u = P_u / A \quad (4)$$

$$\gamma = \varepsilon + 45^\circ - \varepsilon - 45^\circ \quad (5)$$

Por esta técnica foi também possível obter o módulo de cisalhamento do material, a partir das medidas das deformações, com a colagem de extensômetros elétricos a  $\pm 45^\circ$  no centro do corpo-de-prova, portanto, na região entre os dois entalhes. Neste caso é necessário assumir que tanto a tensão quanto a deformação são uniformemente distribuídas ao longo da área ensaiada no corpo-de-prova (Equação 5).

Com o intuito de realizar uma análise fractográfica para ambos os ensaios, uma lupa estereoscópica foi utilizada.

## Resultados

### Avaliação do compósito PPS/fibra de carbono como recebido

A Figura 2 apresenta uma fotomicrografia óptica representativa do laminado de PPS/fibra de carbono recebido da empresa Ten Cate. A partir desta Figura, pode-se observar a uniformidade da distribuição de matriz e reforço ao longo do compósito não apresentando defeitos oriundos de seu processamento que possam influenciar nos resultados obtidos a partir dos ensaios mecânicos, tais como poros, impurezas, delaminações ou microtrincas.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, verificou-se que o teor volumétrico de fibras de carbono do laminado recebido foi de  $63 \pm 6\%$ , conforme a análise realizada pela digestão ácida. Para fins de confirmação, a mesma análise de teor volumétrico de fibra foi realizada por análises termogravimétricas (TGA) sendo, neste caso, obtido o resultado de 74% de fibra de carbono, portanto, próximo aos resultados obtidos por análises de digestão ácida do laminado.

A partir das análises por TGA, a degradação térmica do compósito também foi avaliada, como ilustra a Figura 3. A análise ocorreu de 30 até 1000 °C e o processo de decomposição ocorre em uma única etapa que se inicia próximo de 350 °C (100% da massa) e termina próximo de 650 °C (78% da massa), sendo mais proeminente próximo de 525 °C (88% da massa). Como a análise foi realizada em ambiente inerte (gás nitrogênio), a decomposição do compósito, envolveu quase que exclusivamente a decomposição da matriz PPS, preservando-se o reforço de fibra de carbono. Com isso, no resíduo da decomposição há fibra de carbono intacta e vestígios da matriz carbonizada.

### Condicionamento ambiental

As Figuras 4a e b apresentam, respectivamente, as taxa de absorção de umidade do laminado imerso em banho higrotérmico e em solução salina, até a estabilização dos valores encontrados.

Em ambos os condicionamentos o material alcançou um estado de saturação em 30 dias de imersão. A partir da análise das curvas, pode ser observado que o compósito absorveu aproximadamente 0,35% de umidade máxima em banho higrotérmico e 0,10% em condicionamento de solução salina. Esses valores são considerados baixos para compósitos de aplicação aeroespacial, considerando que laminados obtidos a partir de compósitos de fibra de carbono/epóxi absorvem até 4% de umidade, a partir do mesmo nível de agressividade<sup>[11,22]</sup>.

Na Figura 4, a região de crescimento linear corresponde ao processo de absorção de umidade até a estabilização do ganho de massa, representando a máxima absorção de umidade. Nesse caso, a presença de microtrincas e vazios no material podem explicar o rápido ganho de massa nos primeiros dias de condicionamento. No entanto, longos períodos de exposição à umidade podem causar um ganho de massa excessivo associado com o aumento do volume livre do material, devido à absorção de água por difusão segundo a 1ª lei

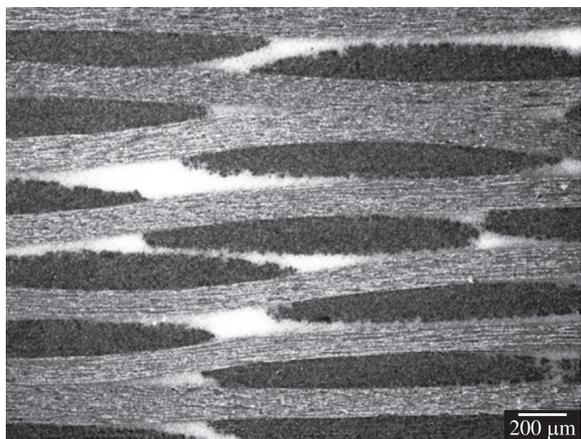


Figura 2. Fotomicrografia do PPS/fibra de carbono obtida pelo microscópio óptico.

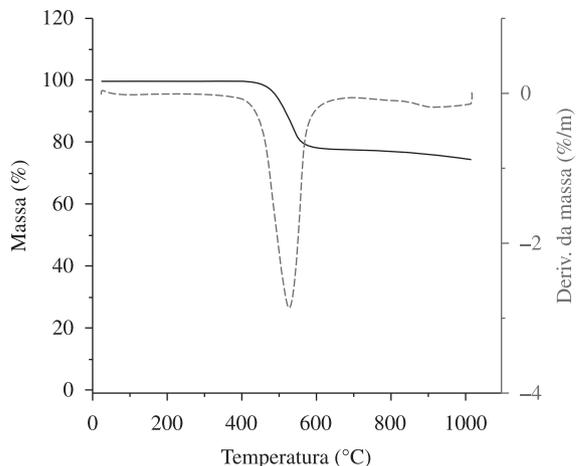
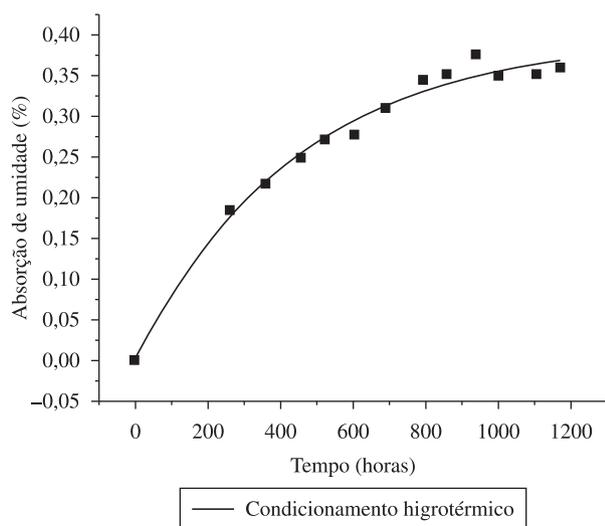
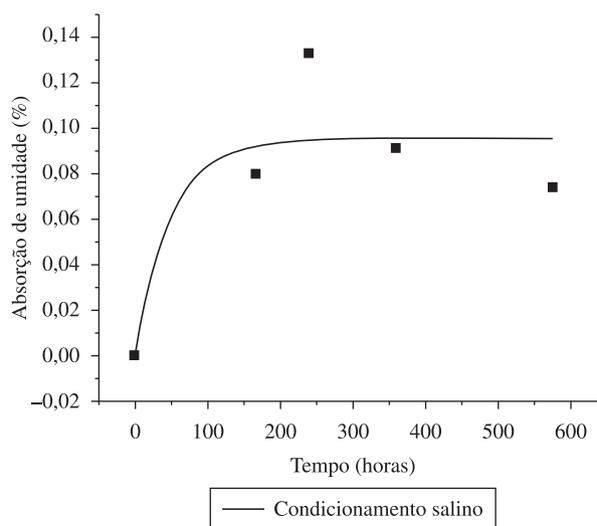


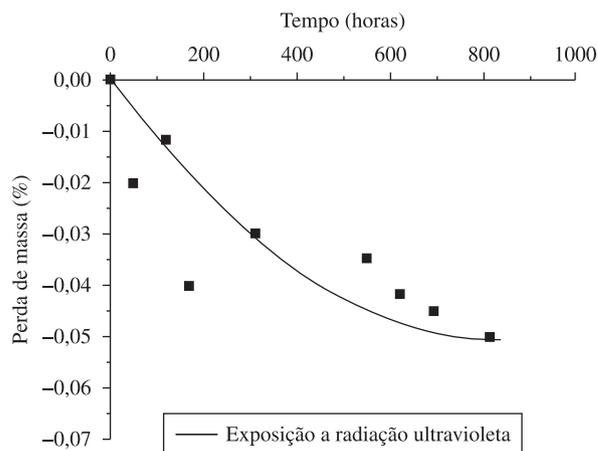
Figura 3. Curva TGA para o material.



(a)



(b)



(c)

Figura 4. a) Ganho médio de massa em condicionamento higrotérmico; b) ganho médio de massa em condicionamento salino; e c) perda média de massa sob exposição UV.

de Fick. Com o tempo, a absorção se torna mais lenta tendendo para uma estabilidade, já que ocorre relaxação das cadeias poliméricas e processos de preenchimento dos poros e cavidades.

Na mesma Figura 4, no item c, é apresentado o gráfico de uma gradativa perda de massa da amostra do compósito. Tal comportamento deve-se a ação da radiação UV-B, que até 900 horas

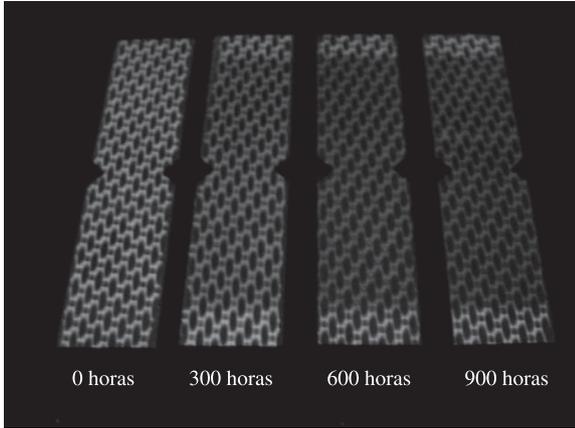


Figura 5. Degradação superficial devido à exposição à luz UV.

causa uma perda de até 0,06% de massa. Esta degradação ocasionada na amostra deve-se, provavelmente, ao aumento da reticulação resultante da reação de foto-oxidação induzida pela radiação UV-B. Associado a este fato, também foi observado neste trabalho, como evidenciado na Figura 5, a agressividade da radiação ultravioleta sobre os laminados de PPS/fibras de carbono quanto expostos a diferentes tempos de condicionamento. Como pode ser observado nesta Figura, a coloração da amostra é alterada gradativamente com o tempo de exposição, evidenciando a ocorrência de degradação superficial na amostra. Esta mudança confirma a ocorrência do processo de foto-oxidação, onde há a formação de grupos químicos cromofóricos absorvedores de luz visível.

#### Propriedades de cisalhamento

A Tabela 1 apresenta, respectivamente, as propriedades de cisalhamento interlaminar e cisalhamento no plano avaliados para o compósito sob diferentes condicionamentos. Como pode ser verificado a partir dos resultados apresentados, o material condicionado, tanto em meio higrotérmico, quanto em salino ou após radiação ultravioleta, sofreu degradação de suas propriedades mecânicas.

A Tabela 1 apresenta a média dos valores máximos de tensão de cisalhamento interlaminar obtidos a partir do ensaio de ILSS, em

Tabela 1. Propriedades de cisalhamento para a fibra de carbono/PPS.

| PPS/ fibra de carbono                     |           | Tensão máxima de cisalhamento ILSS (MPa) | Tensão máxima de cisalhamento Iosipescu (MPa) | Módulo de cisalhamento (GPa) |
|---|-----------|--|---|------------------------------|
| Não condicionado                          |           | 58.4 ± 1.9                               | 109.2 ± 0.4                                   | 4.9 ± 0.7                    |
| Condicionamento higrotérmico (1440 horas) |           | 50.1 ± 8.2                               | 102.7 ± 3.0                                   | --                           |
| Condicionamento salino (720 horas)        |           | 56.4 ± 1.4                               | 95.6 ± 9.1                                    | --                           |
| Exposição UV                              | 300 horas | 57.2 ± 2.2                               | 103.0 ± 6.6                                   | --                           |
|   | 600 horas | 52.2 ± 2.0                               | 98.0 ± 10.7                                   | --                           |
|   | 900 horas | 53.3 ± 1.3                               | 94.4 ± 5.6                                    | --                           |

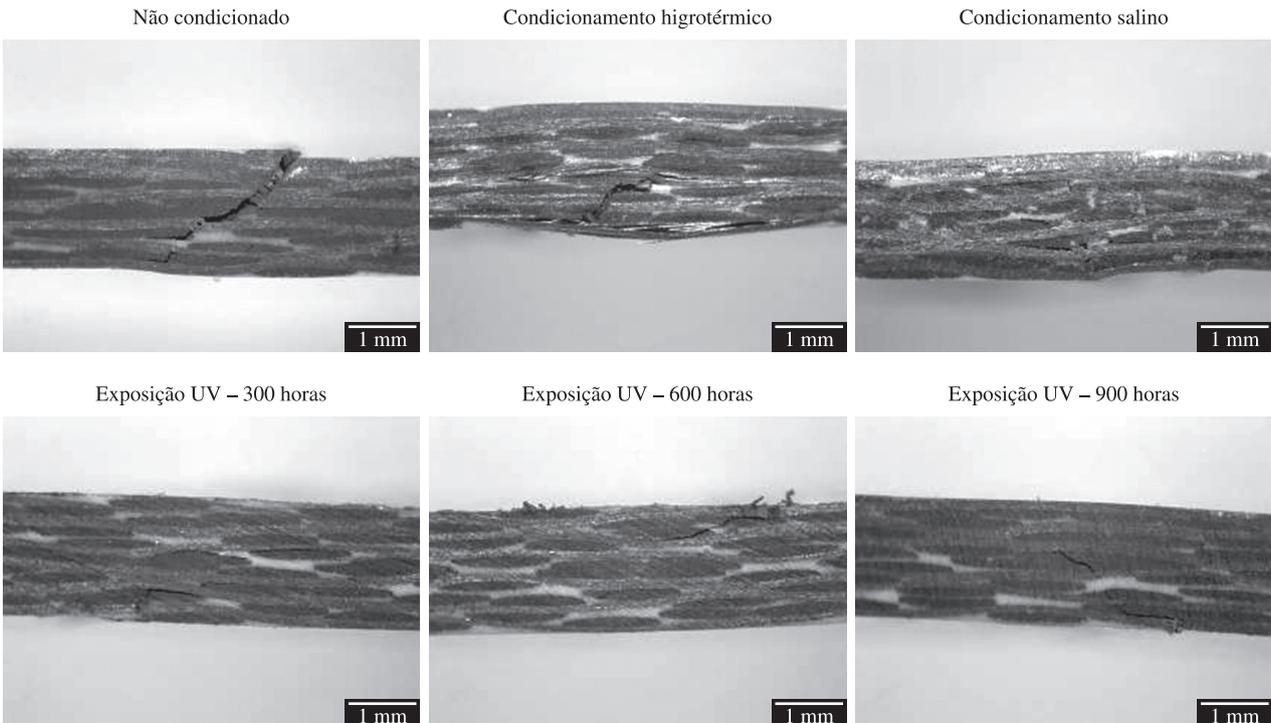


Figura 6. Fratura representativa observada para os métodos ILSS.

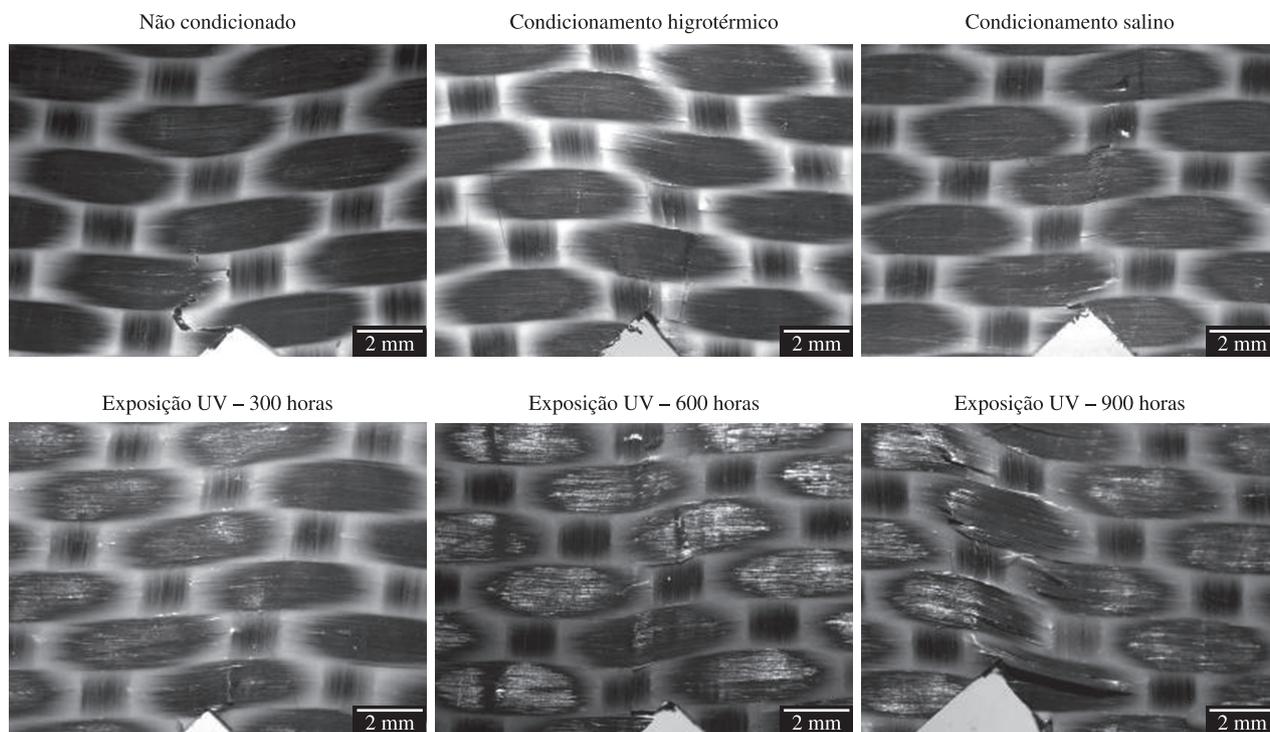


Figura 7. Fratura representativa observada para o método Iosipescu.

que os compósitos não condicionados apresentaram uma tensão de cisalhamento interlaminar de  $58,4 \pm 1,9$  MPa. Sob condicionamento, esta propriedade decaiu em torno de 14 e 3%, respectivamente, após banho higrotérmico e banho salino. Já após o condicionamento por radiação UV houve um decréscimo de 2% após exposição a 300 horas, 11% após 600 horas e 9% após 900 horas, quando comparado aos valores obtidos do compósito não-climatizado.

As mesmas condições de condicionamento ambiental foram realizadas para o ensaio via método Iosipescu sendo os resultados obtidos disponibilizados na mesma Tabela 1. O laminado ensaiado pelo método Iosipescu teve uma tensão de cisalhamento no plano de  $109,2 \pm 0,4$  MPa e apresentou um módulo de cisalhamento de  $4,90 \pm 7$  GPa. A tensão de cisalhamento no plano teve um decréscimo de 6% após condicionamento higrotérmico e 12% após condicionamento salino. O condicionamento por exposição à radiação UV provocou na resistência de cisalhamento no plano um decaimento de 6% para o condicionamento a 300 horas, 10% para o condicionamento a 600 horas e 14% para o condicionamento a 900 horas. O módulo de cisalhamento não foi determinado para os condicionamentos ambientais devido a problemas de colagem de strain gauges em compósitos úmidos.

Os banhos de imersão, tanto higrotérmico quanto salino, podem provocar a degradação da interface devido à ação plasticizante da umidade absorvida e alocada na região amorfa da matriz polimérica. A umidade também induz ligações de hidrogênio entre matriz e água ou outras moléculas que alteram as propriedades de cisalhamento do material. Já a luz ultravioleta age no sentido de quebrar por foto-oxidação a cadeia principal do polímero, ocasionando micro trincas na superfície da matriz<sup>[23,24]</sup>.

As imagens obtidas pela análise fractográfica para ambos os ensaios encontram-se apresentadas nas Figuras 6 e 7. Na Figura 6 pode-se observar a morfologia de fratura dos corpos-de-prova, condicionados e não condicionados, ensaiados pelo método ILSS. Todos os corpos-de-prova apresentaram falhas características das fraturas interlaminares, como delaminações paralelas ao

comprimento da amostra. No entanto há evidências de falhas por flexão com fraturas que percorrem todo o corpo-de-prova perpendicularmente ao comprimento do material.

A partir da Figura 7 pode-se observar os perfis de falhas dos corpos-de-prova ensaiados pelo método Iosipescu. Do mesmo modo que para o método ILSS, foram analisados os corpos-de-prova não condicionados e condicionados. Neste caso, novamente todos apresentaram o mesmo modo de falha característico deste método com região de fratura concentrada entre os dois entalhes.

## Conclusão

O efeito do condicionamento ambiental foi avaliado pelos métodos de cisalhamento Iosipescu e ILSS no compósito PPS/fibra de carbono. A partir dos resultados encontrados neste trabalho de pesquisa, observou-se que o material absorveu em torno de 0,35% de umidade após o ponto de saturação no condicionamento higrotérmico e 0,10% de umidade quando em condicionamento salino. Observou-se também que este compósito perdeu aproximadamente 0,05% da massa quando exposto à radiação UV.

Para todas as amostras expostas aos condicionamentos ambientais, os valores de cisalhamento foi observado que os valores de cisalhamento ILSS reduziram cerca de 14 e 3%, após os condicionamentos higrotérmico e salino, respectivamente. Resultados similares foram observados para as amostras quando analisadas por cisalhamento Iosipescu, sendo neste caso observado uma redução das tensões de cisalhamento de 6 e 12%, após os condicionamentos higrotérmico e salino, respectivamente. Esta queda do desempenho mecânico destes compósitos encontra-se associada possivelmente a degradação da interface devido à ação plasticizante da umidade absorvida, induzindo a formação de ligações de hidrogênio entre a matriz e as moléculas de água presentes, alterando as propriedades de cisalhamento do material.

Com relação ao condicionamento por UV, as amostras apresentaram uma redução de 2 e 6% a 300 horas, 11 e 10% a 600 horas, 9 e 14% a 900 horas, considerando os ensaios de ILSS e

Iosipescu, respectivamente. Este redução se deve, possivelmente, a ação da radiação ultravioleta em quebrar por foto-oxidação a cadeia principal do polímero, ocasionando micro trincas na superfície da matriz

Todos os compósitos, condicionados e não condicionados, apresentaram o mesmo modo de falha após a realização dos ensaios de ILSS e Iosipescu. O compósito testado pelo método ILSS exibiu múltiplas delaminações interlaminares longitudinais ao comprimento do corpo-de-prova e algumas delaminações perpendiculares ao comprimento. Já os laminados avaliados após o ensaio de Iosipescu apresentaram o mesmo modo de falha característico deste método com região de fratura concentrada entre os dois entalhes.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido da FAPESP (projeto 05/54358-7) e CNPq (projeto 306053/2006-3), assim como a empresa holandesa Ten Cate Company, pelo fornecimento dos materiais.

## Referências Bibliográficas

- Nohara, L. B. - "Estudo da interface de compósitos termoplásticos estruturais processados a partir de fibras de carbono com superfícies modificadas", Dissertação de mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos (2001).
- Baley, C.; Daves, P.; Yves, G. & Dolto, G. - Appl. Comp. Mat., **11**, p.99 (2004).
- Botelho, E. C.; Pardini, L. C. & Rezende, M. C. - Mat. Sci. Eng. A, **452-457**, p.292 (2007).
- Faria, M. C. M. - "Avaliação do efeito higrotérmico nas propriedades mecânicas dos compósitos de PPS/fibras contínuas", Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Guaratinguetá (2008).
- Arici, A.; Sinmazçelik, T. & Çapan, L. - J. Comp. Mat., **39**, p.2354 (2005).
- Jang, J. & Kim, H. S. - J. Appl. Polym. Sci., **60**, p.2297 (1996).
- Perng, L. H. - Polym. Degrad. Stab., **69**, p.323 (2000).
- Lee, K. H.; Park, M.; Kim, Y. C. & Choe, C. R. - Polym. Bull., **30**, p.469 (1993).
- Suwanwatana, W.; Yarlagadda, S. & Gillespie, J. W. - Comp. Sci. Technol., **66**, p.1713 (2006).
- Nohara, L. B.; Nohara, E. L.; Moura A.; Gonçalves, J. M. R. P.; Costa, M. L. & Rezende, M. C. - Polímeros, **16**, p.104 (2006).
- Cunha, J. A. P.; Costa, M. L. & Rezende, M. C. - Polímeros, **16**, p.193 (2006).
- Botelho, E. C.; Pardini, L. C.; Rezende, M. L. & Costa, M. - J. Mat. Sci., **40**, p.3615 (2005).
- Zenkert, D. - Comp. Struct., **17**, p.331 (1991).
- Sala, G. - Composites Part B, **31**, p.357 (2000).
- Botelho, E. C. & Rezende, M. C. - Polímeros, **10**, p.E4 (2000).
- Manhani, L. G. B. & Pardini, L. C. - "Determination of the tensile and shear strength in synthetic graphite by using the iosipescu shear test", in: *Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, Uberlândia, MG, p.198 (2001).
- Botelho, E. C. - "Compósitos aeronáuticos processados a partir de fibra de carbono impregnadas com poliamida 6/6 via processo de polimerização interfacial", Tese de doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos (2002).
- Liu, K. & Piggott, M. R. - Composites, **26**, p.829 (1995).
- Wang, Y. & Hahn, T. H. - AFM. Compos. Sci. Technol., **67**, p.92 (2007).
- Baker, A.; Dutton, S. & Kelly, D. - "Composite materials for aircraft structures", American Institute of Aeronautics and Astronautics, Blacksburg (2004).
- ASTM - "ASTM-D5379 - Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method".
- Botelho, E. C.; Pardini, L. C. & Rezende, M. C. - J. Mat. Sci., **41**, p.7111 (2006).
- Schweitzer, P. A. - "Corrosion of polymers and elastomers", in: "Corrosion engineering handbook", Taylor & Francis Group, Pennsylvania (2006).
- Andrady, A. L. - "Ultraviolet radiation and polymers", in: "Physical properties of polymers handbook", J. E. Mark. (ed.), Springer, Nova York (2007).

Enviado: 04/05/10

Reenviado: 12/08/10

Aceito: 23/10/10

DOI: 10.1590/S0104-14282011005000042