

Erosão em Compósitos à Base de Fibras de Vidro/Kevlar e Resina Epóxi de uso Aeronáutico

Rogério A. Silva
Engenharia de Materiais, Embraer

Mirabel C. Rezende
Divisão de Materiais, IAE, CTA

Resumo: Este trabalho tem como objetivo principal o estudo e a análise da eficiência de dois diferentes tipos de revestimentos usados na proteção contra o processo de desgaste por erosão em substratos fabricados em materiais compósitos poliméricos de uso aeronáutico, dando ênfase às peças fabricadas em fibras de vidro / kevlar impregnadas com resina epóxi. Revestimentos protetores baseados em um determinado tipo de tinta de poliuretano e um filme incolor de poliuretano foram utilizados para a avaliação da resistência à erosão, quando submetidos ao jateamento com microesferas de vidro. Para a realização dos ensaios de erosão foi projetado e construído um dispositivo específico para esse fim. Nos ensaios alguns fatores foram considerados, tais como: a natureza física das partículas abrasivas de microesferas de vidro, a distância, a velocidade e o ângulo de ataque das partículas durante o processo de jateamento. Os corpos-de-prova foram analisados quanto à sua variação de massa. Foram, também, utilizadas técnicas metalográficas na preparação de corpos-de-prova que foram analisados por microscopias óptica e eletrônica de varredura, assistida pela técnica de EDS, caracterizando o processo de erosão.

Os resultados mostraram que os corpos-de-prova de compósitos poliméricos revestidos somente com a tinta de poliuretano apresentaram baixa resistência no ensaio de erosão. Entretanto, esta tinta quando protegida pelo filme incolor de poliuretano teve sua resistência à erosão aumentada na ordem de 5 vezes, aumentando, conseqüentemente, a vida útil do componente aeronáutico em sua aplicação final. Devido à facilidade de aplicação do filme de poliuretano no componente a ser protegido, os resultados deste estudo já estão sendo utilizados pelos fabricantes de aeronaves e operadores.

Palavras-chave: *Compósitos poliméricos, erosão, proteção contra erosão, filmes de poliuretano.*

Erosion on Composite Materials Based on Glass and Kevlar Fibers/epoxy Resin Used in the Aeronautical Industry

Abstract: The main goal of the present work is to evaluate the efficiency of two different coatings used as protection against the erosion wear process of glass/kevlar fibers/epoxy resin substrates, on aircraft structures. Coatings based on polyurethane paint and a colorless polyurethane film had their resistance against erosion evaluated, when subjected to blasting of glass beads. Some factors, such as the physical nature of the glass bead abrasive, the distance from the glass bead source to the target, the particles speed and attack angle were considered during the blasting operation. A special apparatus was developed for the erosion tests. The protection against erosion was evaluated by weight loss of the specimens. Optical microscopy and scanning electron microscopy assisted by EDS technique were also used to characterize the erosion process. The results showed that the polyurethane paint presents low erosion resistance. However, the efficiency of this paint was increased nearly 5 times when coated with a colorless polyurethane film, increasing consequently the service life of the aircraft component. Considering the easy application of the polyurethane film onto the aircraft components, and based upon the results obtained this film is currently being used by manufacturers and operators of aircrafts.

Keywords: *Polymer composites, erosion, erosion protection, polyurethane film.*

Autor para correspondência: *Mirabel C. Rezende, Divisão de Materiais/IAE/CTA, Pça Mal.-do-Ar Eduardo Gomes, 50, CEP: 12228-904, São José dos Campos, SP. E-mail: mirabel@iae.cta.br*

Introdução

A erosão por partículas sólidas é um processo de desgaste, definido como sendo a remoção de material de um substrato pelo impacto repetitivo de partículas, que se movem a velocidades superiores a 1,0 m/s, constituindo-se em um importante mecanismo de desgaste, observado em uma grande variedade de condições ambientais^[1].

Apesar da erosão de materiais, em particular de metais, ser estudada há muito tempo, o entendimento desse fenômeno em materiais compósitos ainda é pouco conhecido e tem se tornado alvo de pesquisas na área de materiais de engenharia, principalmente no campo aeronáutico.

O processo de desgaste conhecido como erosão por partículas sólidas, ocorre quando uma partícula discreta atinge uma superfície. A extensão do desgaste depende do número e da massa das partículas que atingem a superfície, bem como da forma, natureza, tamanho, velocidade, tempo e ângulo de impacto das partículas abrasivas no substrato. Os mecanismos de desgaste por erosão podem envolver deformação plástica e fratura frágil. O processo de erosão em metais usualmente envolve deformação plástica, já no caso de materiais frágeis, esses podem se romper devido à deformação ou à fratura, dependendo das condições de impacto, sendo que, o índice de erosão, E , é definido pela equação 1^[2].

$$E = \frac{\text{massa de material removido}}{\text{massa de partículas erosivas que atingem a superfície}} \quad (1)$$

O interesse pelo estudo do fenômeno de erosão foi impulsionado pelo surgimento e evolução de muitas técnicas de observação do comportamento de materiais, entre essas, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a microscopia óptica de luz polarizada (MOLP), que permitem examinar a superfície de materiais após esses serem submetidos ao processo de erosão. Dessa forma, uma melhor análise do aspecto superficial de materiais sujeitos à erosão tem proporcionado a elaboração de muitos modelos e mecanismos de perda de material nesse processo, tentando relacionar a taxa de erosão com as propriedades físicas e mecânicas dos materiais^[1].

Os compósitos estruturais, também conhecidos como compósitos avançados, são materiais de engenharia constituídos de fibras de reforço, com orientação definida ou não, dispersas em uma matriz metálica, cerâmica ou polimérica^[3]. O trabalho em

questão enfoca os compósitos poliméricos, que são materiais formados de fibras de reforço aglutinadas por uma matriz polimérica. Esses se caracterizam por possuírem boas propriedades mecânicas (resistência à tração entre 800-1400 MPa) aliadas a baixos valores de massa específica ($\sim 2 \text{ g/cm}^3$)^[4,5], podendo ser processados de diferentes maneiras, por exemplo, laminação manual, moldagem por transferência de resina (RTM), moldagem em autoclave, etc.

A constante necessidade de redução de peso em aeronaves e estruturas espaciais alavancaram o desenvolvimento da tecnologia de compósitos poliméricos estruturais. Muitos elementos estruturais possuem dimensão considerável e a única forma de moldá-los é pela utilização da tecnologia de pré-impregnados, que são materiais compósitos de fibra/resina em um estágio intermediário de cura da resina, prontos para o processo de moldagem^[6]. Desde o advento dos compósitos poliméricos, a indústria aeronáutica tem se utilizado dessa tecnologia na fabricação de peças para aeronaves, com a vantagem de processar componentes de geometria simples e complexas com menor peso, atendendo aos requisitos de resistência mecânica exigidas ao uso^[6].

Cerca de 15% da área externa da aeronave ERJ-145 é constituída de componentes baseados em materiais compósitos, tais como: carenagens, asa-fuselagem, "dorsal-fin", bordo de ataque da deriva, nacas de entradas de ar, portas do trem de pouso, radomes e superfícies móveis (*flaps* e *aleirons*). Todos esses componentes, principalmente os fabricados em fibras de vidro e resina epóxi, estão sujeitos ao processo de erosão quando a aeronave está em operação. Esse fato tem motivado o estudo sistemático desse fenômeno, bem como a avaliação de revestimentos mais resistentes à erosão, com o intuito de minimizar os problemas referentes a esse processo de desgaste provocado em peças de materiais compósitos poliméricos de uso aeronáutico, reduzindo as horas paradas e, conseqüentemente, a manutenção da aeronave, obtendo-se com isso uma redução de custo para o operador^[7].

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar os resultados obtidos no estudo da resistência à erosão de compósitos poliméricos pré-impregnados, à base de fibras de vidro e kevlar, impregnadas com resina epóxi, revestidos com uma tinta de poliuretano, de base poliéster, de uso convencional na indústria aeronáutica nacional, e também, da tinta de poliuretano

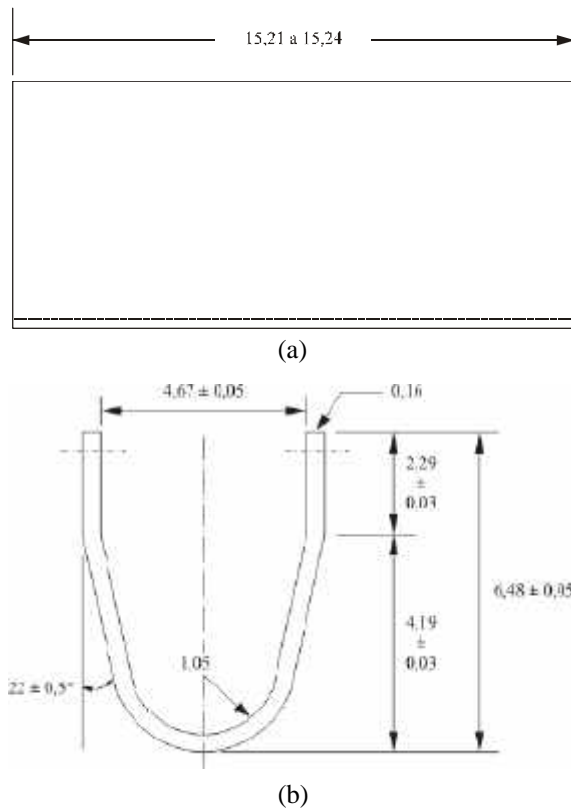


Figura 1. Dimensões em cm do corpo-de-prova em compósito polimérico utilizado nos ensaios de erosão. Vista lateral (a) e vista frontal (b).

protegida por um filme elastomérico termoplástico incolor de poliuretano com auto adesivo acrílico.

Experimental

Parâmetros de jateamento

Para os ensaios de erosão foram preparados corpos-de-prova (cdp's) com as dimensões mostradas na Figura 1, simulando o bordo de ataque de uma aeronave, ou seja, a superfície frontal sujeita ao ataque das partículas.

A Tabela 1 apresenta a configuração dos cdp's estudados, os quais foram fabricados utilizando-se mate-

Tabela 1. Configuração dos corpos-de-prova utilizados, com a descrição dos materiais utilizados.

Identificação	Configuração
01-A	compósito polimérico (fibra de vidro/kevlar / resina epóxi)
01-B	compósito polimérico/ <i>primer</i> epóxi/tinta de poliuretano
01-C	compósito polimérico/ <i>primer</i> epóxi/tinta de poliuretano/ filme incolor de poliuretano

riais de uso rotineiro da indústria aeronáutica. Para cada configuração foram preparados três corpos-de-prova.

A figura 2 ilustra a disposição das camadas de pré-impregnados dos corpos-de-prova preparados. Os pré-impregnados foram fornecidos pela empresa Hexcel Composites e as especificações desses materiais encontram-se na própria figura. O revestimento dos corpos-de-prova com a tinta de poliuretano-poliéster *high solids*, "Eclipse series" teve como base a aplicação do *primer epóxi* cromato de estrôncio 10P4-2/EC-117, ambos fornecidos pela Akzo Nobel (USA), que foram aplicados utilizando-se uma pistola convencional (sucção) Devilbiss, tipo JGA, bico AV-2115, Ex 1.8-0,70, com uma pressão de 40-60 psi, com uma espessura de filme seco de 15 a 75 microns respectivamente.

O filme adesivo incolor de poliuretano utilizado foi o 3M-8671 com 0,03 mm de espessura, fornecido pela empresa 3M (USA).

Para a realização dos ensaios de erosão foi projetado e fabricado um dispositivo para simular em laboratório o processo de erosão^[7], ilustrado na figura 3. Este dispositivo foi adaptado em uma câmara de jateamento devido ao grau de periculosidade envolvido nesse processo. O fluido utilizado para simular o processo de erosão foi baseado em uma mistura de ar e microesferas de vidro com forma esférica, de tamanho médio de 210 µm. Este tipo de partícula foi escolhido de maneira a simular as partículas existentes no ar e que entram em contato frontal direto com a aeronave, provocando a erosão. O jato de microesferas foi frontal aos corpos-de-prova, simulando os processos de pouso e decolagem de uma aeronave.

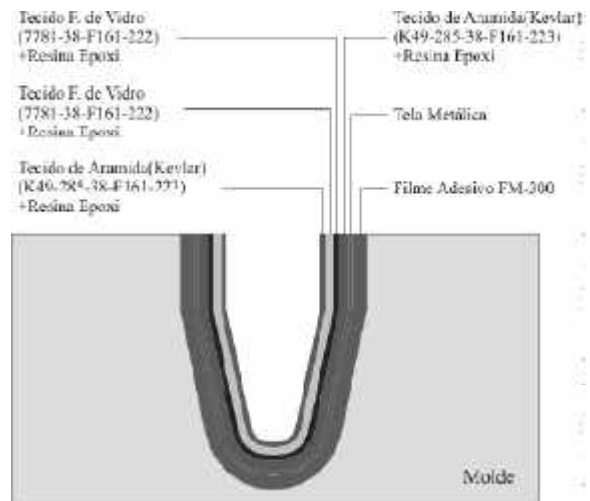


Figura 2. Disposição das camadas de pré-impregnados na preparação dos corpos-de-prova.

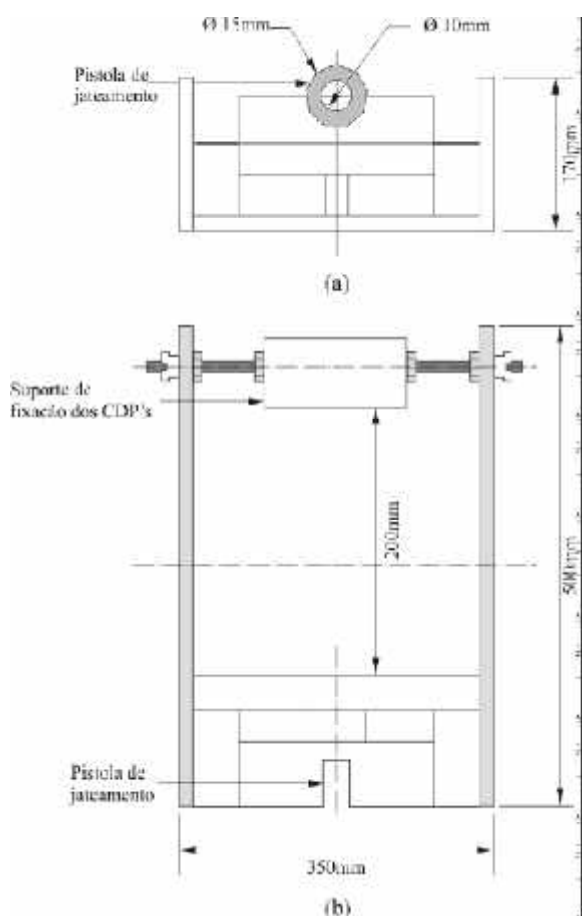


Figura 3. Esquema do dispositivo projetado e utilizado nos ensaios de erosão. Vista frontal (a) e vista superior (b).

O ângulo de ataque das partículas foi de 8° e a velocidade de 65 m/s. Estes parâmetros foram determinados em trabalho prévio^[7], aproximando-se dos valores especificados no envelope de operação da aeronave EMBRAER- ERJ 145. A distância de jateamento foi também definida em estudo anterior^[7]. Esta distância influencia fortemente os resultados dos ensaios de erosão e, portanto, esse parâmetro deve ser estabelecido criteriosamente de forma que um perfil de ataque homogêneo na região central do corpo-de-prova seja obtido. Durante os ensaios preliminares verificou-se que quanto maior a distância entre a ponta da pistola de jateamento e o corpo-de-prova, maior é a abertura do leque do jato de microesferas de vidro e, conseqüentemente, maior é a dispersão das partículas, não permitindo, assim, a definição de uma área de jateamento representativa. Portanto, a distância de jateamento definida foi de 200 mm, em que o perfil de ataque, área atingida pelas partículas utilizadas no ensaio de erosão, representou cerca de 25% da área frontal do corpo-de-prova.

O tempo de jateamento também foi definido em ensaios preliminares^[7], variando-se de 30 em 30 s a exposição do corpo-de-prova ao fluido de ataque, verificando-se que, o rompimento do corpo-de-prova de compósito, sem nenhum tipo de revestimento ocorria em torno de 2 min. Sendo assim, o tempo de jateamento foi fixado em 3 min para a realização das análises comparativas do efeito dos diferentes revestimentos em estudo no processo de erosão.

Ensaio de erosão

Após a definição dos parâmetros de jateamento, simulando as condições reais de uma aeronave em operação, foram iniciados os ensaios de erosão. Para isso, os corpos-de-prova preparados conforme as configurações da Tabela I foram submetidos, em triplicata, a um jateamento frontal com as partículas de microesferas de vidro. Após o jateamento, os corpos-de-prova foram retirados do dispositivo, limpos com um leve jato de ar comprimido seco, de maneira a remover poeiras de microesferas de vidro da superfície, inspecionados visualmente quanto aos danos gerados na superfície, embalados em sacos plásticos e submetidos a uma análise mais detalhada da região atingida.

Caracterização das amostras

Os corpos-de-prova, antes e após o processo de jateamento, foram secos em estufa à temperatura de 110°C até massa constante, sendo pesados em uma balança analítica de 10 mg de precisão. As amostras, antes e após os ensaios de erosão, foram embutidas em baquelite, lixadas e polidas e as superfícies observadas com o auxílio de um estereoscópio Wild Heerbrugg 166153.

Resultados e Discussão

Análise gravimétrica dos corpos-de-prova

A figura 4 apresenta a variação de massa dos corpos-de-prova após o ensaio de erosão. A barra de desvio mostra que a variação de massa para uma mesma configuração foi pequena, aproximadamente 2% em massa, revelando que o sistema de jateamento proposto e o controle dos parâmetros de processo forneceram dados com boa repetição. Analisando-se os valores encontrados, observa-se que os corpos-de-prova que não estavam revestidos com o filme incolor de poliuretano, configuração 01-A e 01-B, reduziram sua massa, devido à

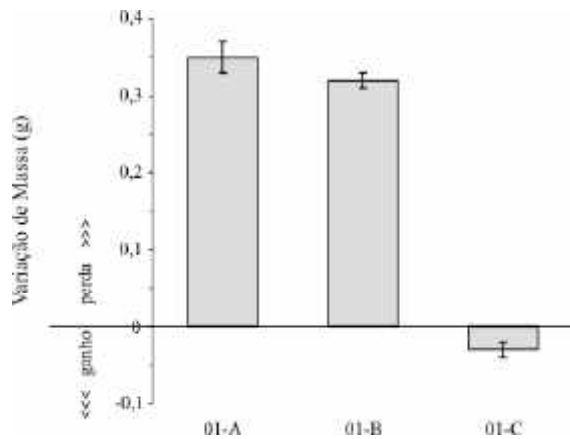


Figura 4. Variação de massa dos cdp's após o jateamento com microesferas de vidro, velocidade de 65 m/s, ângulo de incidência de 8°, tempo de 3 min e distância de 200 mm.

perda de massa do material durante o processo de jateamento, enquanto que, quando revestidos com o filme incolor de poliuretano apresentaram um ganho de massa em relação à sua massa inicial, devido à incorporação de partículas do abrasivo na superfície do filme. Este fenômeno é conhecido na literatura como fase de incubação no processo de erosão^[1,7]. A figura 5 mostra partículas de microesferas de vidro impregnadas na superfície do filme incolor de poliuretano. A confirmação da presença de partículas foi feita via análises por espectroscopia dispersiva de elétrons (EDS), a qual mostrou a presença de silício nas diferentes regiões da amostra. A análise da figura 5 mostra que o tamanho médio inicial das partículas de microesferas de vidro, aproximadamente 210 µm, diminuiu para 20 µm à 50 µm, devido ao choque com o substrato. Para manter as mesmas condições de jateamento, o equipamento utilizado sepa-

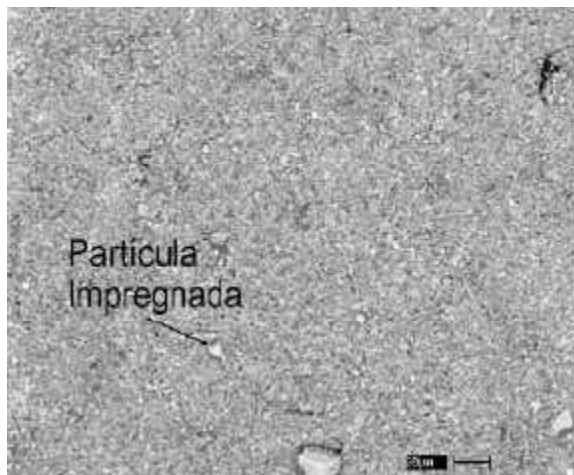


Figura 5. Fotomicrografia (MEV) da superfície do cdp's revestido com o filme incolor de poliuretano, mostrando as partículas de microesferas de vidro impregnadas na superfície após o processo de jateamento.

rava as partículas menores, mantendo o fluido de jateamento sempre com a mesma distribuição granulométrica das partículas.

Análise microscópica

A figura 6(a) mostra o aspecto geral do corpo-de-prova de configuração identificado como 01-A (Tabela 1), antes do processo de erosão. A figura 6(b) mostra o detalhe por MEV da textura da superfície do corpo-de-prova antes do processo de erosão. A figura 6(c) apresenta a seção transversal das camadas do compósito antes do ensaio de erosão. A região A deve-se à camada de filme adesivo. A região B, mais clara, mostra a tela metálica de cobre, utilizada como região de metalização da peça. As camadas C, D, E e F, são devidas aos pré-impregnados com fibras contínuas de vidro e kevlar. As figuras 6(d) e 6(e) ilustram o aspecto do corpo-de-prova após o jateamento com microesferas de vidro, sendo observado o perfil do jateamento, com o rompimento do substrato na região frontal ao jato. A análise da figura 6(e) mostra, ainda, as dimensões do dano gerado no jateamento, observando-se que o perfil de jateamento foi de aproximadamente 25mm x 18mm e a área com o rompimento total do substrato de compósito foi em torno de 8mm por 5mm. Este perfil de jateamento foi característico para as configurações 01-A e 01-B, revelando o controle sistemático dos parâmetros de jateamento utilizados. Utilizando-se da técnica metalográfica já descrita, a figura 6(f) mostra a fotomicrografia da seção transversal do corpo-de-prova após o jateamento, atingindo as camadas internas do substrato, observando o rompimento da estrutura do corpo-de-prova.

A figura 7(a) mostra o aspecto geral do corpo-de-prova de configuração identificado como 01-B antes do processo de erosão. A figura 7(b) mostra a fotomicrografia da seção transversal do corpo-de-prova antes do processo de erosão, onde as regiões A e B são referentes às camadas de tinta de poliuretano e de *primer* epóxi, respectivamente. A região C deve-se à camada de filme adesivo. A região D, mais clara, mostra a tela metálica de cobre, utilizada como região de metalização da peça. As camadas E, F, G e H são devidas aos pré-impregnados com fibras contínuas de vidro e kevlar. A figura 7(c) ilustra o aspecto do corpo-de-prova após o jateamento com microesferas de vidro, sendo observado o perfil do jateamento, com o rompimento do substrato na região frontal ao jato,

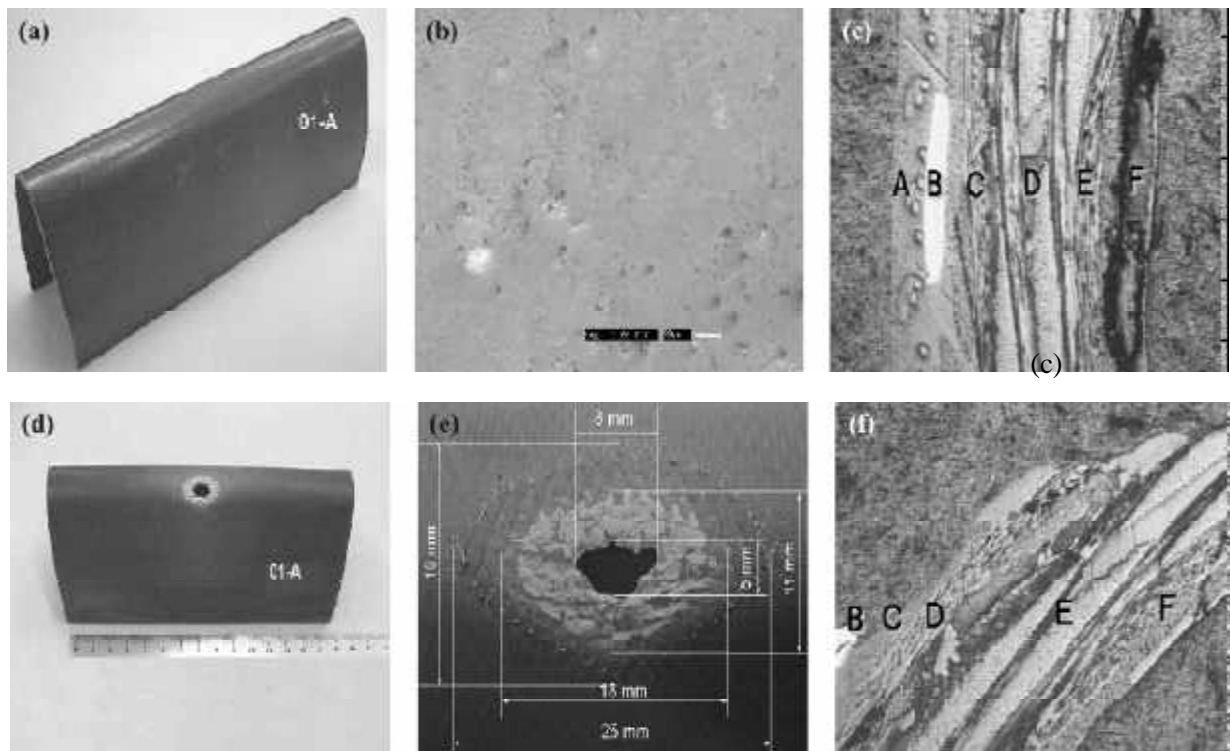


Figura 6. Aspectos típicos do cdp de compósito polimérico identificado como 01-A: (a) vista geral do cdp antes do ensaio de erosão com microesferas de vidro; (b) detalhe da textura da superfície do compósito polimérico por MEV; (c) MOLP da seção transversal das camadas do compósito antes do ensaio de erosão; (d) vista geral do cdp após o ensaio de erosão; (e) detalhe da superfície do cdp após o ensaio de erosão; e (f) MOLP da seção transversal das camadas do compósito após o ensaio de erosão.

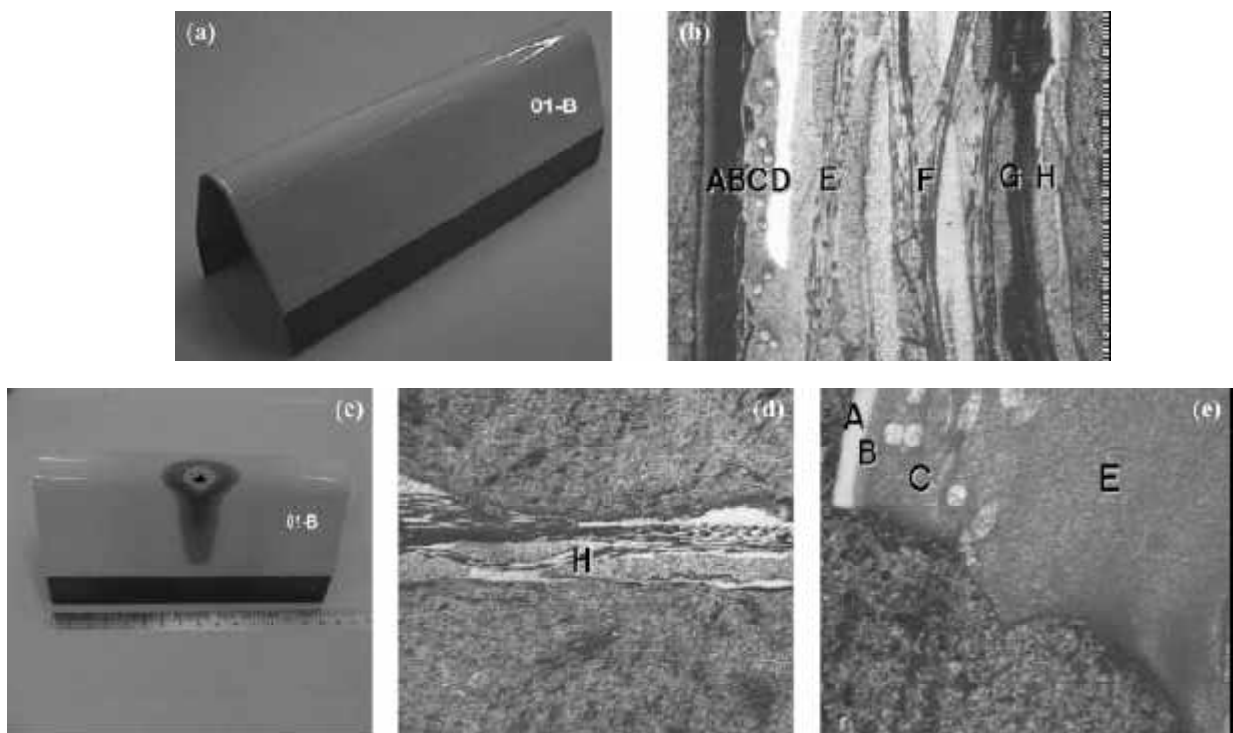


Figura 7. Fotomicrografias típicas do cdp de compósito polimérico identificado como 01-B: (a) antes do ensaio de erosão com microesferas de vidro; (b) vista transversal das camadas do compósito antes do ensaio de erosão; (c) detalhe da superfície após o ensaio de erosão; (d) e (e) vistas transversais das camadas do compósito após o ensaio de erosão.

com a remoção do *primer* epóxi e da tinta de poliuretano na região próxima ao dano. As figuras 7(d) e 7(e) ilustram as fotomicrografias da seção transversal do corpo-de-prova após o jateamento, mostrando as camadas internas atingidas do substrato, onde é observado o rompimento da estrutura do corpo-de-prova.

A figura 8(a) apresenta o corpo-de-prova identificado como 01-C, constituído de material compósito e protegido superficialmente com *primer* epóxi/tinta de poliuretano/filme incolor de poliuretano, após o ensaio de erosão. A figura 8(b) ilustra com mais detalhes a região frontal do corpo-de-prova após o jateamento com as microesferas de vidro, aproximadamente 40mm de extensão, sendo evidenciada uma região mais escura atingida pelo jato de microesferas

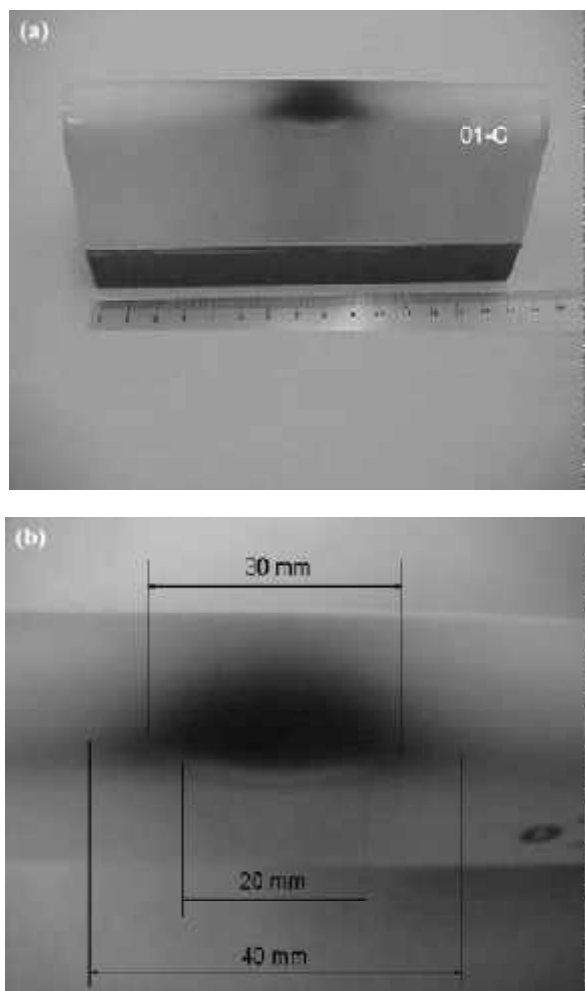


Figura 8. Aspecto geral típico do cdp identificado como 01-C após o ensaio de erosão com o de jateamento com microesferas de vidro (a); e (b) detalhe da superfície atingida pelo jato de microesferas de vidro à velocidade de 65 m/s, ângulo de ataque de 8°, distância de 200 mm durante 3 min.

de vidro, provocada pelo superaquecimento da região do jato. Porém, não foi observado o rompimento do filme incolor de poliuretano no tempo de jateamento de 3 min, bem como qualquer dano no substrato de compósito polimérico. A região mais escura apresentou dimensão de aproximadamente 30mm.

Esse resultado confirma que o filme incolor de poliuretano aumentou a resistência à erosão do corpo-de-prova. Este comportamento é atribuído ao aparecimento de uma região de incubação e agregação de partículas de microesferas de vidro no filme, conforme já ilustrado nas figuras 4 e 5. Nesse caso, foi verificado um ganho médio de massa de 0,035 g.

Para melhor caracterizar os processos de erosão em estudo, corpos-de-prova com as mesmas configurações já descritas, foram submetidos ao ensaio de jateamento com as partículas abrasivas de microesferas de vidro utilizando as mesmas condições dos ensaios já realizados, só que neste caso até o rompimento total de todos os substratos em estudo, sendo o intervalo para o controle da variação da massa de 30 em 30 segundos.

Os resultados obtidos de perda de massa em função do tempo estão apresentados na figura 9. Na figura 9(a) pode-se observar que o corpo-de-prova identificado como 01-B de compósito polimérico/*primer* epóxi/tinta de poliuretano começou a perder massa desde o início do ensaio de erosão, sendo que a sua estrutura em compósito rompeu aos 2 min. de jateamento.

A figura 9(b) mostra que o corpo-de-prova identificado como 01-C (com o revestimento do filme de poliuretano) não apresentou perda de massa logo no início do ensaio de erosão. Este resultado evidencia uma região de incubação, equivalente a um período de cerca de 9 min, podendo-se observar que somente após esse período é que começou a perda de massa em relação à massa inicial do corpo-de-prova, com o rompimento do substrato em torno de 9,5 min. A análise da área de jateamento mostra que houve um superaquecimento em torno do dano na estrutura do corpo-de-prova. Na região de rompimento do substrato, observa-se uma degradação térmica do material, sugerindo que os processos de desgaste devem ter ocorrido por erosão e ablação, simultaneamente. A probabilidade da ocorrência de desgaste por ablação é confirmada pela nítida presença de superaquecimento da região de jateamento.

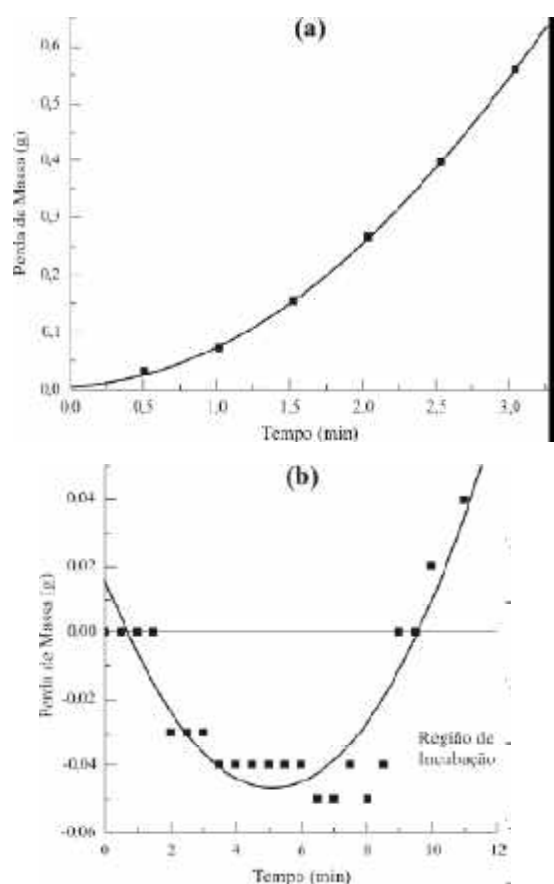


Figura 9. Curvas de perda de massa em função do tempo de jateamento dos cdp identificados como 01-B (a) e 01-C (b).

Conclusão

Com base nos resultados obtidos neste trabalho pode-se concluir que o dispositivo projetado e construído para a realização dos ensaios de erosão mostrou-se adequado e confiável, fornecendo resultados repetitivos de perfis de jateamento. A avaliação dos dois diferentes acabamentos superficiais, obtidos pela aplicação de uma tinta de poliuretano, base poliéster, e pela combinação de tinta de poliuretano e um filme incolor de poliuretano, sobre substratos de compósitos poliméricos de resina epóxi e fibras de vidro e kevlar, de uso aeronáutico, mostrou que: os compósitos poliméricos, sem acabamento superficial, apresentam baixa resistência à erosão, com o rompimento do substrato em períodos de tempo em torno de 2 min; os substratos revestidos com a tinta de poliuretano apresentaram um melhor acabamento superficial. Entretanto, em cerca de dois minutos de jateamento os corpos-de-prova também apresentaram o rompimento do compósito polimérico. No entanto, quando esses mesmos substratos foram revestidos com

o filme incolor de poliuretano a sua resistência à erosão foi aumentada em aproximadamente cinco vezes, não sendo observado qualquer rompimento do filme ou do substrato de compósito. A aparência escura observada na superfície do filme é devido, provavelmente, aos processos simultâneos de erosão e ablação. O aumento da resistência à erosão observada, neste caso, deve-se ao fato do filme de poliuretano favorecer o aparecimento de uma região de incubação, que retardou de maneira significativa o início da perda de massa do corpo-de-prova, aumentando, conseqüentemente, a vida útil do componente aeronáutico em sua aplicação final. Devido à facilidade de aplicação do filme de poliuretano no componente a ser protegido, os resultados deste estudo já estão sendo utilizados pelos fabricantes de aeronaves e operadores.

Agradecimentos

À Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A - Embraer e à Divisão de Materiais do Centro Técnico Aeroespacial (CTA/IAE/AMR) pelo apoio dado para a realização deste estudo.

Referências Bibliográficas

1. Shewmon P., Sundarajan G.S. - The Erosion of Metals, *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 13,301(1983).
2. Sundarajan G.S, Roy M. - Solid Particle Erosion Behavior of Metallic Materials at Room and Elevated Temperatures, *Tribology International*, 30,339 (1983).
3. Newas, G.M- Polymer matrix composites, in structures and properties of composites
In.: Chou, T.W. (Ed.). *Material Science and Technology Series*. [S.1]: VCH Publishers, v.13(1993).
4. ASM International Commitee. *Engineered Materials Handbook, USA: ASM International*, v.1: composites (1987).
5. Pardini, L.C. e Peres, R.J.C. - Polímeros: Ciência e Tecnologia, p.32-42, VI (1996).
6. ASM International Commitee. *Engineered Materials Handbook, USA : ASM International*, 1987, v.2 : Engineering plastics.
7. Silva, R.A - "Erosão em materiais de uso aeronáutico". Dissertação de mestrado. ITA- Brasil(2001).

Recebido: 05/06/02

Aprovado: 05/02/03