

## DETECÇÃO DOS MODOS DE FALHAS EM PAINÉIS AERONÁUTICOS OBTIDOS POR COLAGEM SECUNDÁRIA E SUBMETIDOS A ENSAIOS DE FADIGA E AO CONDICIONAMENTO AMBIENTAL

Marina Ronconi de Oliveira<sup>1</sup>  
Maurício Vicente Donadon<sup>1</sup>  
Rita de Cássia Mendonça Sales-Contini<sup>3</sup>

Aluna do Curso de Tecnologia em Projetos de Estruturas Aeronáuticas: Marina Ronconi de Oliveira;  
e-mail: marina.oliveira5@fatec.sp.gov.br

Professor do ITA: Prof. Dr. Maurício Vicente Donadon; e-mail: donadon@ita.br Professora da FATEC:  
Prof. Dra. Rita de Cássia Mendonça Sales Contini; e-mail: rita.sales@fatec.sp.gov.br

**Área do Conhecimento:** Colagem secundária. Painéis reforçados. Efeito higrotérmico. Fractografia.

### INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos, quando sujeitos a cargas compressivas, costumam apresentar comportamento elástico linear até o momento em que a resistência máxima é atingida e o processo de fratura é desencadeado. Nesse momento, a capacidade de carga do material compósito diminui progressivamente até a completa propagação da fratura pelo material e, então, considera-se que a estrutura falhou. Contudo, as falhas podem estar diretamente ligadas à carga compressiva ou a fatores associados aos materiais e aos processos de fabricação.

Outro fator que pode causar falhas em estruturas aeronáuticas é a condição ambiental sob a qual a aeronave está exposta durante a operação. As estruturas primárias e secundárias de compósitos utilizados em aeronaves geralmente sofrem ciclos de absorção e dessorção de água e esse tipo de fadiga não mecânica é relacionado à durabilidade dos compósitos a longo prazo (OPELT et al., 2018).

Portanto, o objetivo deste trabalho é descrever os aspectos de falha de painéis compósitos reforçados, obtidos pela tecnologia de colagem secundária, submetidos a teste de fadiga pós-flambagem. Os painéis reforçados foram submetidos a 300.000 ciclos de carga sob compressão uniaxial e, posteriormente, testados quanto à caracterização da resistência residual. A influência do envelhecimento higrotérmico foi investigada comparando-se os aspectos de fratura dos painéis testados em temperatura ambiente (RTA) com os testados em condições de temperatura ambiente úmida (RTW).

### METODOLOGIA

A fabricação do painel foi feita a partir de uma fita unidirecional de fibra de carbono pré-impregnado(a) com resina epóxi. Foi utilizado o filme adesivo epóxi Loctite® EA 9695 contendo uma tela de poliéster para os painéis manufaturados por intermédio da tecnologia de colagem secundária. Para simular a presença de uma trinca inicial, um filme de Teflon® de 0,085mm foi inserido durante o processo de fabricação.

Os painéis receberam as designações de acordo com o condicionamento ambiental ao qual foram submetidos: sem condicionamento ambiental e ensaiado a temperatura ambiente e submetido ao condicionamento higrotérmico de 80°C e umidade relativa de 90% e ensaiado a temperatura ambiente. Os painéis foram pesados antes de serem colocados na câmara de condicionamento ambiental. A absorção de umidade foi analisada de acordo com os procedimentos indicados pela norma ASTM 5229/5229M (2010). Após a saturação, os painéis foram retirados da câmara e submetidos aos ensaios mecânicos de fadiga em compressão e de resistência residual.

Os painéis foram inspecionados visualmente para que fossem determinados os modos de falha. As regiões onde ocorreram as falhas no painel foram fotografadas com o auxílio de uma câmera fotográfica. Os modos de falha globais foram, então, classificados de acordo com Opelt et al. (2018). Os espécimes com falha mais crítica foram analisados de maneira fractográfica mais detalhada.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 representa uma comparação entre a localização e as respectivas falhas encontradas nos dois condicionamentos ambientais. Foi possível identificar os seguintes modos de falha dos painéis: *in-plane shear* (PS), *through-the-thickness shear* (TS), *wedge splitting* (WS), *delamination buckling* (DB), *longitudinal cracking* (LC), bem como o descolamento da fibra na região do adesivo e entre o reforçador (SFB).

Figura 1 - Painel 1 da tecnologia de colagem secundária - RTA x RTW.

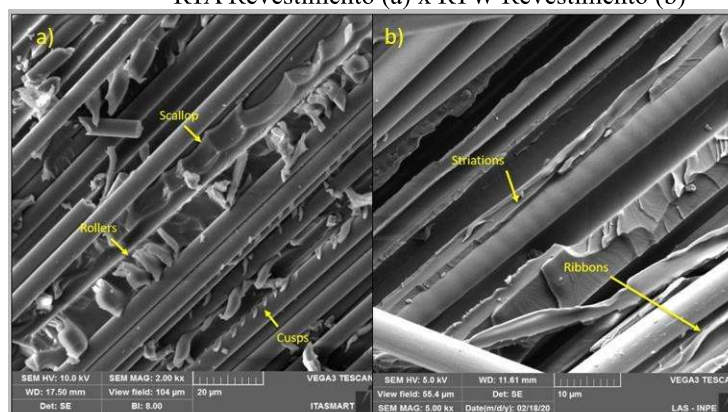


Durante os testes, foram observadas mudanças no nível de intensidade das falhas ao comparar os painéis testados nas condições de RTA e RTW.

Os espécimes com falha mais crítica foram selecionados para uma análise fragtográfica mais detalhada. Durante os testes, o reforçador apresentou uma falha catastrófica. Os aspectos de falha na interface reforçador-revestimento dos painéis apresentaram uma mistura de diferentes modos de falha em RTA, como, por exemplo, fibras soltas e falha *light-fiber-tear* (LFT), caracterizada por uma fina camada de resina na matriz próxima à superfície visível no adesivo.

A região de delaminação da interface entre o reforçador-revestimento foi ampliada para buscar alguns aspectos de falha induzidos pelo carregamento cíclico. São eles: rolos (*rollers*), cúspides (*cusps*), estrias (*striation*), “curvas” (*scallops*) e fitas (*ribbons*), localizados na superfície da matriz polimérica.

Figura 2 - Aspectos de falha induzidos por carregamento cíclico RTA Revestimento (a) x RTW Revestimento (b)



## CONCLUSÕES

Este tema é de suma importância, pois visa o entendimento de novas tecnologias e processos para a obtenção de melhores estruturas para o setor aeroespacial. No ensaio de tecnologia de colagem secundária, nos painéis ensaiados em condições ambientais úmidas, os modos de falha não mudaram em comparação com os painéis testados em condições de temperatura ambiente, porém alguns se mostraram mais intensos.

A análise fractográfica mostrou que o processo de ruptura ocorreu na interface reforçador-revestimento, onde mistura de diferentes modos de falha em RTA, como, por exemplo, fibras soltas e LFT. A presença de cúspides, rolos, estrias, fitas e “curvas” também foram identificadas em ambos os condicionamentos ambientais.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao CNPq/CPS pela bolsa CNPq de Iniciação Tecnológica, ao Laboratório de Novos Conceitos em Aeronáutica (LNCA) localizado no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) pela cessão dos equipamentos pela infraestrutura oferecida para o desenvolvimento desse projeto.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AMERICAN STANDARTIZATION TESTING MATERIALS. **ASTM D 5229/D5229M-12: Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials.** West Conshohocken, PA, 2010.

OPELT C.V., CÂNDIDO G.M., REZENDE M.C. **Compressive failure of fiber reinforced polymer composites – A fractographic study of the compression failure modes.** Materials Today Communications, v. 15, p.218–227, 2018.