

Estudo do Modo de Falha de Juntas Híbridas Metal-Compósito Submetidas a Cisalhamento por Tração

Darlan Machado de Souza*, Alessandro Augusto Olimpio Ferreira Vittorino, Leandro João da Silva, Ruham Pablo Reis.

*Laprosolda - Universidade Federal de Uberlândia - UFU, darlan.aeroufu@gmail.com

Palavras-chave

Juntas Híbridas, União Metal-Compósito, CMT-PIN

1. INTRODUÇÃO

A utilização de materiais compósitos tem se tornado cada vez mais frequente no mundo da engenharia, principalmente na área de transportes. Isto se deve, sobretudo, devido à redução de peso estrutural e a comparável eficiência mecânica que estes materiais apresentam quando confrontados com estruturas metálicas. Na indústria aeronáutica, o evidente uso de compósitos realçou a necessidade de uma integração eficiente entre estruturas em compósito e metálicas adjacentes por meio de processos avançados de união. As maneiras mais usuais para realizar tais operações de união são: a fixação por elementos mecânicos; geralmente por intermédio de rebites e/ou parafusos; e a utilização de juntas adesivas (Ribeiro, 2009).

Recentemente, a combinação de uniões adesivas com elementos mecânicos de fixação, as chamadas uniões híbridas, tem sido alvo de estudo e vem apresentando bons resultados com desempenho mecânico superior e sem penalizar o peso das estruturas, se comparado à utilização de métodos de união puramente adesivos ou por elementos mecânicos de fixação. Como será detalhado mais adiante, atualmente se tornou possível ter pequenos pinos metálicos soldados na parte metálica, por uma técnica derivada da soldagem MIG/MAG em sua variante CMT-PIN, antes da laminação de compósito sobre esta, o que então forma uma união híbrida metal-compósito.

A técnica de soldagem CMT-PIN tem como base a soldagem através do curto circuito controlado CMT (*cold metal transfer*). Mais informações sobre o processo MIG/MAG CMT podem ser encontradas na literatura (Selvi et al., 2018). Já a diferença do CMT para o CMT-PIN reside no fato que este último inclui um programa de controle responsável por fazer com que o arame-eletrodo fique encostado contra a poça de fusão, sem arco aberto, permitindo seu resfriamento, e solidificação de sua base. Logo em seguida, é imposta uma baixa corrente, de tal forma a aquecer e amolecer o arame já soldado. Com o movimento de reversão iniciado, característica do CMT, o arame fica sujeito a uma força de tração e é rompido no ponto menos resistente, assim, formando pinos sobre a chapa. Mais informações sobre o CMT-PIN também podem ser encontradas na literatura (Skhabovskiy et al., 2017).

Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar aspectos relacionados ao modo de falha de juntas híbridas metal-compósito em carregamento de cisalhamento por tração com pinos obtidos por CMT-PIN, depositados a 120° com a superfície da parte metálica e dispostos com espaçamento uniforme na região de união com a parte compósita. A expectativa é que, através das filmagens com a câmera convencional, seja possível compreender o mecanismo de falha da união híbrida. Esta avaliação é parte de um estudo mais amplo em termos da influência da disposição de pinos depositados por soldagem CMT-PIN em união híbrida metal-compósito.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o constituinte metálico da junta foram utilizadas chapas de aço AISI 304 e para a laminação do constituinte em compósito utilizou-se 15 lâminas de pré-impregnado de fibra de vidro/epóxi (7781-38"-F155 da *Hexcel Corporation*®) gerando, após a cura, uma espessura capaz de propiciar o total recobrimento dos pinos. Levando em consideração trabalhos anteriores (Ucsnik et al., 2010 e Felice, 2017), escolheu-se o pino CMT-PIN do tipo *Ball head* para a função de ancorador dentro da junta. Para a deposição dos 25 pinos em cada chapa, espaçados lateralmente e longitudinalmente em 6,25 mm, utilizou-se o arame-eletrodo da classe AWS/ASME SFA 5.9 ER309LSI, com diâmetro nominal de 1 mm. A mistura de gás de proteção foi de Ar+3,4% CO₂, a uma vazão de 9 litros/min. A distância bico de contato-peça (DBCP) foi mantida constante em 5 mm. Os parâmetros selecionados para a deposição dos pinos foram: *Altitude Adaptation* em -30; *Base Adaptation* em -0,1; e *Ball/Cyl Adaptation* em 4,5. Para a fabricação do constituinte em compósito das juntas, utilizou-se a técnica de cura a quente através de uma prensa a quente CARVER modelo CMG100H-15-C. A pressão constante de 0,4 MPa e dois patamares de temperatura (120°C por 30 min + 160°C por 30 min) uniformemente distribuídos foram responsáveis por garantir a penetração dos pinos através das camadas de pré-impregnado e a cura

subsequente. A Fig. 1 ilustra as principais características dos corpos de provas fabricados com junta híbrida metal-compósito.

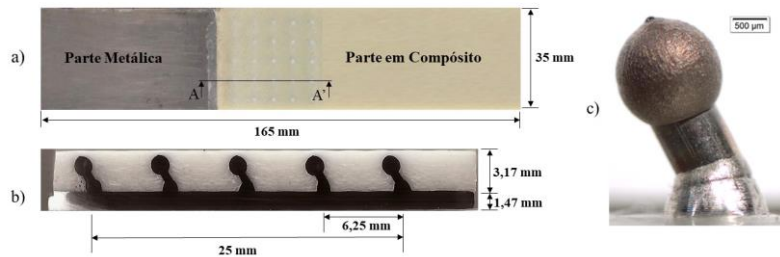


Figura 1: Ilustração de uma junta híbrida metal-compósito. a) vista superior de um CP fabricado; b) detalhe da seção longitudinal A-A' com pinos a 120° e c) detalhe de um pino do tipo *Ball head*

3. RESULTADOS

Para realização do ensaio mecânico de cisalhamento foi utilizada uma máquina universal do tipo servo-hidráulica MTS Landmark 647 de forma a tracionar os CPs e implicar um esforço de cisalhamento nas juntas. Empregou-se também uma câmera digital durante o ensaio de cisalhamento, posicionada de maneira a filmar todo o ensaio do ponto de vista lateral (perfil) dos CPs (Fig. 2). A pressão das garras foi ajustada em 1200 Psi, a velocidade de deslocamento em 1 mm/min e a temperatura ambiente estava em 25 °C. Duas chapas (1,5 mm e 3,17 mm espessura) também foram utilizadas como igualadoras de espessura para os CPs, fazendo com que o plano de união (interface entre chapa metálica e compósito) dos mesmos coincidissem com o plano central de aplicação de carga por meio das garras. Estes ensaios tiveram o objetivo de avaliar a resistência e rigidez gerais e os modos de falha das juntas híbridas.

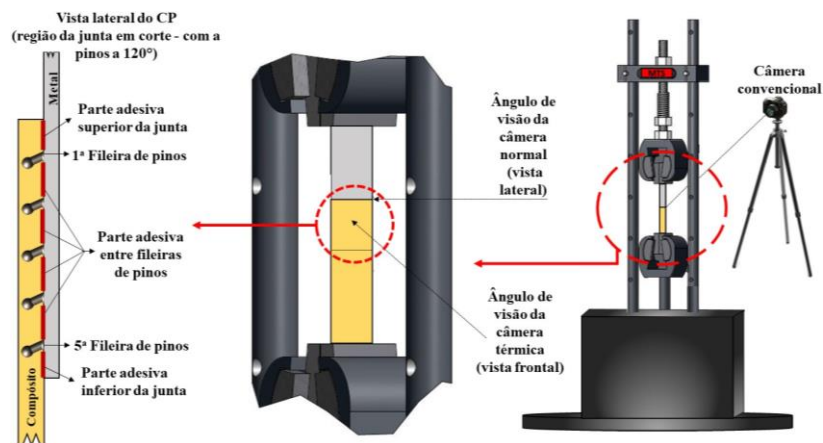


Figura 2: Ilustração do aparato experimental utilizado no ensaio de cisalhamento das juntas, detalhe da região da junta híbrida e da vista lateral em corte

A Fig. 3 exibe os resultados de deslocamento em função das cargas obtidas para os testes de cisalhamento das juntas metal-compósito e das juntas adesivas acrescido da sincronização de imagens obtidas pela câmera digital. As filmagens foram iniciadas ao mesmo tempo dos testes mecânicos, que por serem muito lentos, não implicaram em prejuízos na sincronia, mesmo que aproximada. Foram efetuadas três repetições para todos os testes, por questões de repetitividade estatística e as imagens ilustram o comportamento típico para todos os casos.

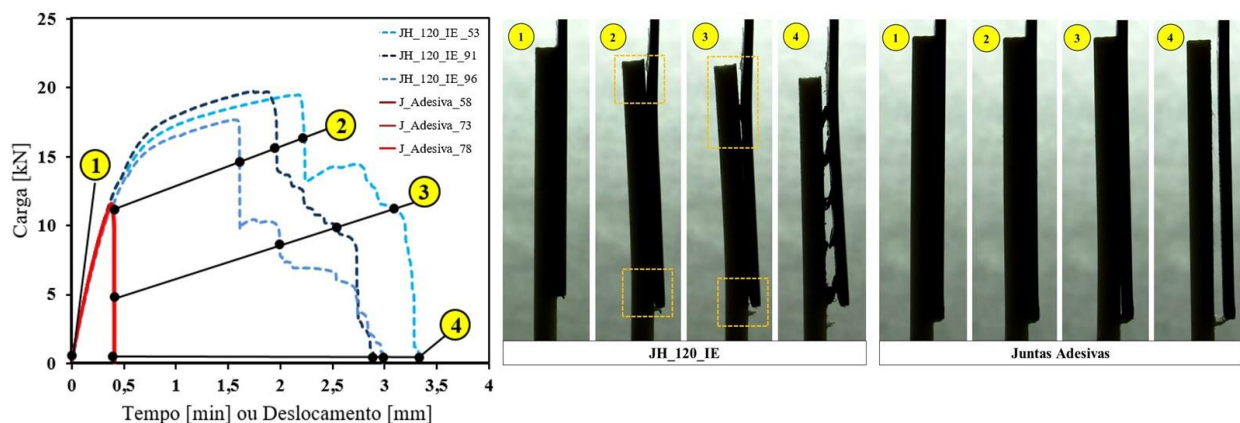


Figura 3: Sincronização de imagens e curva tempo/deslocamento em função das cargas adquiridas típicas das juntas híbridas (JH_120_IE) e adesivas

Tabela 1: Descrição detalhada da sincronização das imagens e curva tempo em função das cargas

Tipo de junta	Descolamentos das partes adesivas (falha do bloco de união adesiva)			Rompimentos (falha do bloco de união por ancoramento dos pinos)
	Superior da junta	Inferior da junta	Entre as fileiras de pinos	Final (quebra ou escape dos pinos)
Híbrida	≈ 0,45 min	≈ 2,18 min	≈ 2,53 min (entre 1° e 2°); ≈ 3,02 min (entre a 2° e 3°); ≈ 3,12 min (entre a 3° e 4°)	≈ 3,00 min
Adesiva	Rompimento instantâneo em 0,27 min			

A partir da Fig. 3, pode ser observado que a carga máxima obtida em média foi de $19,61 \pm 0,67$ kN para o caso das juntas híbridas e de $11,42 \pm 0,13$ kN para o caso das juntas adesivas. O deslocamento final (total/até a falha) médio foi de $3,23 \pm 0,25$ mm, para as juntas híbridas e de $0,41 \pm 0,01$ mm, para as juntas adesivas. Os pinos utilizados para a união híbrida foram capazes de propiciar um ganho 1,7 vezes na carga máxima suportada aliada a um aumento da capacidade de deformação de 7,8 vezes, quando comparado com as juntas adesivas.

Com objetivo de visualizar melhor o comportamento das juntas metal-compósito durante o cisalhamento por tração, os vídeos foram obtidos com resolução elevada com intuito de propiciar uma análise detalhada do modo de falha das juntas. Da Fig. 3 e da Tabela 1, nota-se que o modo de fratura das juntas híbridas (JH_120_IE) é diferente do modo de falha das adesivas. Para o caso das juntas híbridas, a presença dos pinos faz com que a fratura ocorra de forma fracionada (em três partes distintas, como apresentado na Tabela 1) e em blocos (adesivo e por ancoramento dos pinos). Inicialmente, caso híbrido, o descolamento, separação adesiva entre a parte metálica e o compósito no plano de união, ocorre entre a primeira ou quinta fileira de pinos e a borda superior ou inferior da junta (Figs. 2 e 3). Este descolamento então se propaga para o restante do bloco adesivo das juntas (Figs. 2 e 3 - parte adesiva entre as fileiras de pinos). Em seguida, o bloco de união por ancoramento dos pinos, que já atuava retardando o descolamento do bloco adesivo, alcança a falha com rompimento total das juntas. Já para o caso das juntas adesivas, a fratura ocorre de forma instantânea já que apenas um bloco de união está presente, não havendo qualquer resistência residual atuante. Verificou-se também que a parte inferior metálica de todas as juntas tende a se deslocar para o lado direito (se afastando do compósito em comportamento típico de uniões adesivas) entre aproximadamente 0,40 min e 1,13 min. Logo após este momento surgem os primeiros descolamentos de partes adesivas entre os pinos, seguido, por fim, do rompimento dos pinos, de maior resistência, e culminando com a ruptura total da junta.

4. CONCLUSÕES

Primeiramente conclui-se que com a presença das fileiras de pinos a carga máxima suportada por uma junta híbrida ficou 72% (8,19 kN), maior do que a carga máxima suportada pela junta adesiva e que a resistência residual foi de 688% (2,82 mm) superior para uma junta híbrida. E através da análise de falha executada conseguiu-se um maior entendimento da evolução da mesma em juntas metal-compósito com a presença dos pinos, onde os quais provém resistência residual em relação à contribuição do adesivo nas juntas híbridas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laprosolda e ao LMest da FEMEC-UFU e aos Laboratórios de Processamento e Análises Térmicas do Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP-Guaratinguetá, especialmente ao Prof. Edson Cocchieri Botelho, a Alltec Materiais Compostos, assim como as fontes de fomento CAPES, CNPq, FAPEMIG e FAPESP.

6. REFERÊNCIAS

- Felice, I. O., Um Estudo da Influência da Inclinação de Pinos em União Híbrida Metal-Compósito. Projeto de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Aeronáutica, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil. 2017. 74 p.
- Ribeiro, M. L., Programa para análise de juntas coladas: compósito-compósito e metal-compósito. 163p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- Selvi S., Vishvakshan A., Rajasekar E., Cold metal transfer (CMT) technology - An overview, Defence Technology, Volume 14, Issue 1, 2018, Pages 28-44, ISSN 2214-9147, <https://doi.org/10.1016/j.dt.2017.08.002>.
- Skhabovskiy, I. et al., Appraisal of fiber-metal laminate panels reinforced with metal pins deposited by CMT welding, Composite Structures, 180, 2017, 263-275.
- Ucsnik, S. et al., Experimental investigation of a novel hybrid metal-composite joining technology. Composites: Part A, 41, 2010, 369-74.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.