INVESTIGAÇÃO DO EFEITO DA MICROUSINAGEM A LASER NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DA ADESÃO ALUMÍNIO/COMPÓSITO DE MATRIZ EPÓXI REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO

André Sobreira de Oliveira Junior[1] (IC), Renata Neves Penha (PQ)[1]
[1]*Universidade Federal de Itajubá (Unifei))*

Palavras-chave: Adesão metal-compósito. Microusinagem a laser. Resistência ao cisalhamento. Rugosidade superficial. Juntas híbridas.

Introdução

A crescente demanda por materiais que ofereçam alta resistência mecânica e leveza impulsionou o desenvolvimento de laminados de metal e fibra (FMLs) para aplicações em setores como a indústria aeroespacial e automotiva. Esses materiais híbridos, formados por camadas alternadas de ligas metálicas e compósitos reforçados com fibras, combinam as melhores propriedades de ambos os materiais, resultando em estruturas com elevada resistência à fadiga, impacto e baixa densidade. No entanto, a adesão eficiente entre o metal e o compósito é um dos maiores desafios técnicos enfrentados, impactando diretamente a durabilidade e a integridade dessas estruturas[1].

A microusinagem a laser tem se mostrado uma técnica promissora para melhorar essa adesão, criando padrões de microtexturização na superfície do metal, o que aumenta a área de contato e o intertravamento mecânico com o compósito. Estudos demonstram que esse tratamento superficial pode melhorar significativamente a resistência ao cisalhamento de juntas adesivas em ligas de alumínio, amplamente utilizadas em estruturas aeroespaciais. A preparação adequada da superfície por meio de técnicas como a texturização a laser é, portanto, crucial para otimizar a interface entre metal e compósito, promovendo maior durabilidade das juntas adesivas[2-3].

O presente trabalho tem como objetivo investigar o impacto da microusinagem a laser na adesão entre a liga de alumínio 6351-T6 e compósitos de matriz epóxi reforçados com fibra de carbono. Justificado pela necessidade crescente de desenvolver soluções mais eficientes para a união de materiais híbridos, o estudo busca aprimorar as características de adesão dessas juntas, com foco na resistência ao cisalhamento. A expectativa é que a texturização a laser melhore a integridade das juntas, contribuindo para um melhor desempenho mecânico das estruturas híbridas.

Metodologia

Neste estudo, foram utilizados como materiais principais um laminado de liga de alumínio 6351-T6, um laminado feito de tecido de carbono bidirecional tipo sarja 2x2 com gramatura de 200 g/m², resina epóxi Araldite MY 750 BR e o catalisador DY 9577 US.

As amostras de alumínio foram preparadas inicialmente por meio de lixamento manual com lixa de granulação (600). Após o lixamento, as amostras foram imersas em álcool etílico 70% por 15 minutos para eliminar impurezas e garantir a limpeza adequada da superfície. A microusinagem a laser das amostras de alumínio foi realizada utilizando uma Máquina de Gravação a Laser de 30W (*Desktop Fiber Laser*). Três configurações de texturização foram aplicadas: na primeira, foi gerado um *grid* com 25 ranhuras no sentido horizontal e 25 no vertical (25 x 25); na segunda, a quantidade de ranhuras horizontais foi aumentada para 50, mantendo 25 ranhuras verticais (50 x 25); e na terceira, foram adicionadas 50 ranhuras tanto no sentido horizontal quanto no vertical (50 x 50). Cada amostra foi submetida a três passadas do laser, com potência de 30W, velocidade de 5 mm/s e frequência de 10 Hz.

Após a microusinagem, a rugosidade das superfícies foi avaliada utilizando dois métodos: o rugosímetro eletromecânico Taylor-Hobson, que mediu parâmetros como Ra (rugosidade média), Rz (altura média dos picos e vales) e Rt (rugosidade total). As medições foram feitas em cinco pontos distintos das amostras, com três passadas consecutivas para garantir a repetibilidade dos resultados. No entanto, como os resultados obtidos com o rugosímetro não foram conclusivos, foi necessário realizar uma análise mais detalhada utilizando o microscópio confocal interferométrico Leica DCM 3D, que permitiu uma visualização tridimensional da topografia superficial com alta resolução. As topografias obtidas foram analisadas em cinco pontos distintos de cada amostra, utilizando o *software Gwyddion*.

Em seguida, as amostras foram submetidas a uma limpeza ultrassônica. O processo foi realizado na

lavadora ultrassônica Ecel 3L Alpha Plus, utilizando cavitação ultrassônica a 42 kHz por 60 minutos. Posteriormente, no dia dos ensaios de adesão, uma segunda etapa de limpeza foi realizada em álcool 70% por mais 60 minutos.

As amostras de alumínio texturizadas foram unidas ao compósito de fibra de carbono utilizando a técnica de infusão a vácuo (VARTM). Foram aplicadas sete camadas de tecido de carbono, 300 gramas de resina epóxi Araldite MY 750 BR, misturadas com 9 gramas do catalisador DY 9577 US, na proporção de 100:3 em peso. O vácuo foi mantido por 4 horas, eliminando bolhas de ar e garantindo a penetração completa da resina em todas as áreas de contato. Após a infusão, o ciclo de cura foi realizado em duas etapas: 120°C por 1 hora, seguido de 160°C por 2 horas.

Após a cura do compósito, as juntas dissimilares foram cortadas com precisão utilizando a máquina de corte Clipper TR 201 E, com três amostras para cada configuração de texturização. Tabs confeccionados com o mesmo material das juntas foram utilizados para garantir o correto alinhamento das amostras durante os ensaios de tração, minimizando desalinhamentos que pudessem comprometer os resultados. Os ensaios de tração foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaios de 30 kN, seguindo a norma ASTM D3165, para avaliar a resistência ao cisalhamento em juntas sobrepostas (*Lap Shear Strength* - LSS). Durante o ensaio, a carga foi aplicada a uma taxa constante de 1,27 mm/min, e os dados de força e deslocamento foram continuamente registrados, possibilitando a construção de curvas força-deslocamento para análise do comportamento mecânico das amostras até a ruptura. Após os ensaios, a análise das superfícies fraturadas foi realizada com um Estereomicroscópio Binocular Zoom LM360BZ, ajustado para uma ampliação de 10 vezes, permitindo a observação detalhada da morfologia das regiões de fratura em cinco pontos distintos de cada amostra.

Resultados e discussão

Os resultados de rugosidade superficial, medidos pelo microscópio confocal interferométrico Leica DCM 3D, foram obtidos a partir de três amostras da liga de alumínio 6351-T6, texturizadas nas condições de ranhuras 1, 2 e 3. Cinco medições foram realizadas em cada amostra, e os valores de Rt, Rz e Ra foram apresentados na Tabela 1.

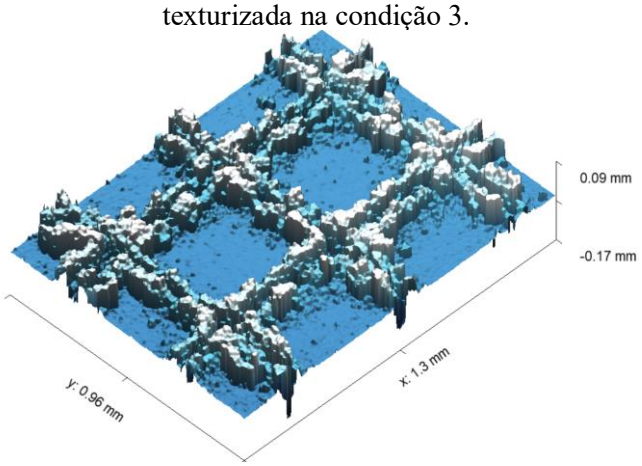
Tabela 1 – Valores de rugosidade por microscopia confocal, Rt, Rz e Ra com suas respectivas médias e desvio padrão.

Condição das Amostras	Condição de Ranhuras	Rt (µm)	Rz (µm)	Ra (µm)
Condição 1	25 x 25	105,20 ±6,92	62,82 ±2,91	1,78 ±0,09
Condição 2	50 x 25	67.67 ±5,93	53,51 ±5,73	3,80 ±0,09
Condição 3	50 x 50	105,42 ±3,74	73,96 ±2,64	6,08 ±0,16

Fonte: Dados do autor (2024).

Analisando os valores de Rz (diferença de altura entre a média dos picos mais altos e os vales mais profundos ao longo do comprimento de avaliação do perfil da amostra), observa-se que a liga de alumínio 6351-T6 texturizada na condição 3 apresentou um valor significativamente maior (73,96 µm) em comparação com a condição 2, que foi de 53,51 µm. Esse aumento pode ser atribuído à maior quantidade de ranhuras na condição 3, que resultou em uma superfície com maiores variações topográficas, gerando picos e vales mais pronunciados (Figura 1). Este comportamento confirma a eficácia da texturização a laser em criar microestruturas que aumentam a área superficial e podem melhorar a adesão mecânica e química[6].

Figura 1 – Topografia da superfície de alumínio texturizada na condição 3.

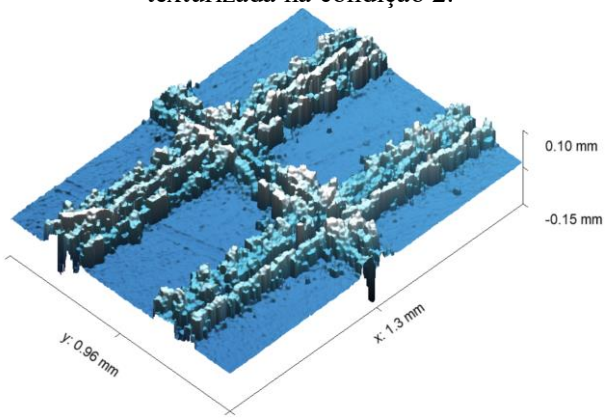


Fonte: Dados do autor (2024).

O valor de Rt, que representa a distância vertical total entre o ponto mais elevado e o mais baixo na superfície, foi maior na condição 3 (105,42 µm) em comparação com a condição 2 (67,67 µm), reforçando que uma maior quantidade de ranhuras gera uma superfície mais rugosa e com variações topográficas mais acentuadas, como mostrado na Figura 2. Da mesma forma, o parâmetro Ra,

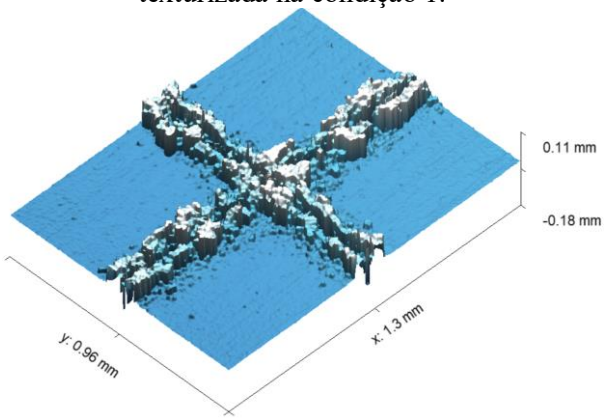
que mede a rugosidade média aritmética, foi maior para a condição 3 (6,08 µm) em relação às condições 1 (1,78 µm) e 2 (3,80 µm), indicando que um maior número de ranhuras aumenta as irregularidades superficiais, o que pode melhorar a ancoragem mecânica. A Figura 3 ilustra a topografia da condição 1, com uma superfície menos rugosa e menores variações, correspondendo aos valores mais baixos de Ra[2, 6].

Figura 2 – Topografia da superfície de alumínio texturizada na condição 2.



Fonte: Dados do autor (2024).

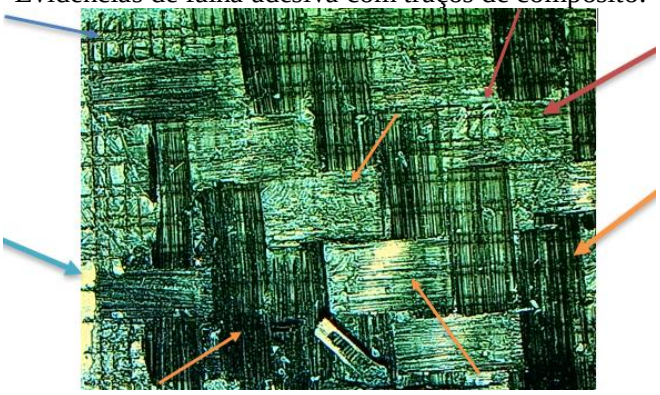
Figura 3 – Topografia da superfície de alumínio texturizada na condição 1.



Fonte: Dados do autor (2024).

A microscopia estereoscópica das superfícies fraturadas após os ensaios de tração forneceu informações importantes sobre os mecanismos de falha em cada condição. As setas azuis na Figura 4 indicam regiões da superfície da liga AA6351-T6 sem a presença de compósito, sugerindo áreas de separação onde a adesão não foi eficiente. As setas vermelhas representam a presença de compósito aderido à superfície em menor quantidade, enquanto as setas laranja indicam regiões com grande quantidade de compósito, caracterizando uma falha coesiva. Na condição 1, predominou a falha coesiva, com grandes quantidades de compósito aderido à superfície de alumínio, indicando uma adesão eficiente (Figura 4). Já nas condições 2 e 3, foi observada uma predominância de fratura no compósito, o que sugere uma adesão excelente em ambas as configurações. A presença de falhas no compósito, em vez de na interface de adesão, limita a análise quantitativa completa dos valores obtidos no ensaio de tração, pois esses valores representam tanto a falha do compósito quanto a da região de adesão. Isso impede uma avaliação precisa da resistência da interface adesiva, embora mostre que ambas as configurações promoveram uma adesão altamente eficiente[4-5].

Figura 4 - Micrografia estereoscópica da condição 1: Evidências de falha adesiva com traços de compósito.

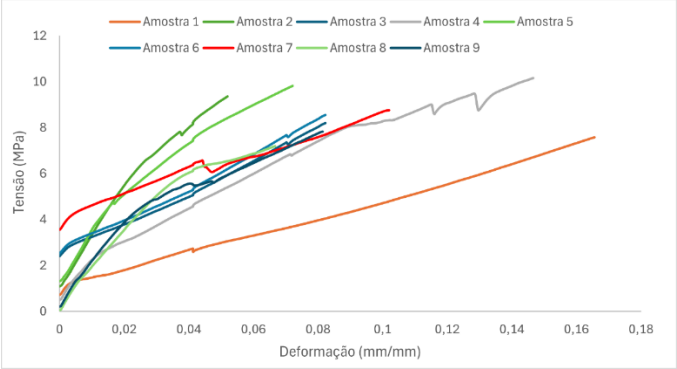


Fonte: Dados do autor (2024).

As curvas Tensão x Deformação (Figura 5) revelaram um comportamento distinto para cada condição de texturização. A condição 2 apresentou as maiores tensões antes da fratura, indicando um intertravamento mecânico mais eficaz, seguida pela condição 1. No entanto, a condição 3 apresentou fraturas predominantemente no compósito, o que impede o uso dos valores obtidos para uma avaliação quantitativa completa da resistência da interface adesiva. Isso não significa que a condição 3 foi inferior à condição 1 em termos de adesão, mas sim que a falha no compósito impossibilitou uma análise mais precisa da interface de adesão. Em todas as condições, a adesão foi eficiente, especialmente nas condições 2 e 3, onde a fratura no compósito sugere uma forte adesão, mas sem permitir uma avaliação isolada da resistência da interface adesiva[4-5, 7].

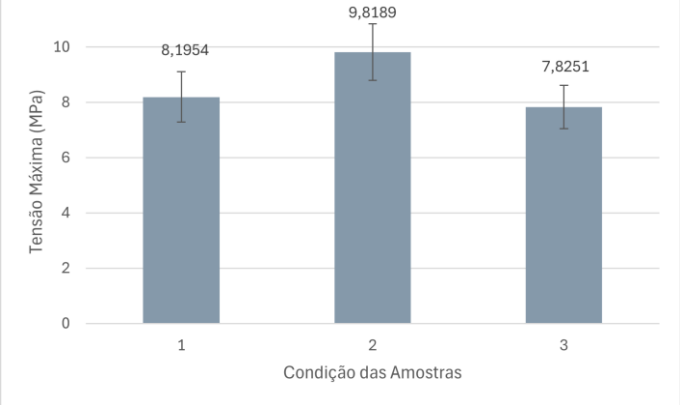
A comparação dos resultados do ensaio de tração, apresentada na Figura 6, destacou a condição 2 como a de maior resistência ao cisalhamento, com uma média de tensão máxima de (9,8189 Mpa). A condição 3, embora tenha apresentado uma média menor (7,8251 MPa), não foi resultado de uma falha na interface adesiva, mas sim de uma falha no compósito, que limitou a avaliação completa da resistência da adesão[4, 7].

Figura 5 – Curvas Tensão-Deformação comparativas de todas as amostras e condições avaliadas.



Fonte: Dados do autor (2024).

Figura 6 – Comparação dos valores médios de tensão máxima obtida para cada condição estudada.



Fonte: Dados do autor (2024).

Por fim, os resultados de rugosidade, medidos por microscopia confocal e apresentados na Tabela 1, mostram que a condição 3 exibiu os maiores valores de Ra (6,08 µm), Rz e Rt, sugerindo uma superfície altamente texturizada. No entanto, apesar desses valores indicarem uma maior rugosidade, a condição 2 apresentou a maior resistência ao cisalhamento, conforme visto na Figura 6, o que sugere que uma rugosidade moderada pode proporcionar uma melhor distribuição de tensões e evitar concentrações excessivas que comprometem a integridade do compósito. Esses resultados indicam que, embora o aumento da rugosidade favoreça o intertravamento mecânico, há um limite ideal para maximizar a resistência ao cisalhamento sem comprometer a integridade do compósito[4-6].

Conclusões

A pesquisa demonstrou que a microusinagem a laser teve um impacto significativo na adesão entre a liga de alumínio 6351-T6 e o compósito de matriz epóxi reforçado com fibra de carbono, especialmente na condição 2, que apresentou os melhores resultados de resistência ao cisalhamento. Embora a condição 3 tenha gerado uma maior rugosidade, a falha predominante no compósito impediu uma avaliação quantitativa precisa da interface adesiva. Esses resultados indicam que a microusinagem a laser, ao criar padrões de texturização específicos, pode otimizar a adesão entre superfícies dissimilares, garantindo maior eficiência em aplicações estruturais híbridas.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo suporte e infraestrutura disponibilizados durante a realização desta pesquisa. Agradecemos também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da bolsa de IC, essencial para a condução deste trabalho.

Referências

[1] ASUNDI, A.; CHOI, A. Y. N. *Fiber metal laminates: an advanced material for future aircraft. Journal of Materials Processing Technology*, v. 63, n. 1-3, p. 384-394, 1997.

[2] WANG, Z.; BI, X.; LIU, B.; XU, M.; DONG, Z. *Enhancement of adhesion of PEEK/6161-T6 FLJ joints via laser surface modification. Composites Part B*, v. 216, p. 108797, 2021.

[3] BOTELHO, E. C.; SILVA, R. A.; PARDINI, L. C.; REZENDE, M. C. *Evaluation of adhesion of continuous fiber–epoxy composite/aluminum laminates. Journal of Adhesion Science and Technology*, v. 18, n. 15-16, p. 1799-1813, 2004.

[4] OMAIREY, S.; JAYASREE, N.; KAZILAS, M. *Defects and uncertainties of adhesively bonded composite joints. SN Applied Sciences*, v. 3, n. 769, 2021.

[5] BANEA, M. D.; DA SILVA, L. F. M. *Adhesively bonded joints in composite materiais: An overview. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, v. 223, n. 1, p. 1-18, 2009.

[6] ISO 4287: *geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: profile method – terms, definitions and surface texture parameters*. Genebra: ISO, 2012.

[7] GRANT, L. D. R.; ADAMS, R. D.; DA SILVA, L. F. M. *Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry. International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 29, n. 4, p. 405-413, 2009.