

## ESTUDO DA TEXTURIZAÇÃO A LASER NA ADESÃO DE UMA JUNTA HÍBRIDA METAL-COMPÓSITO

Luiza L. Giovanelli<sup>1</sup> (IC), Renata N. Penha (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá.

**Palavras-chave:** Cisalhamento. Fibra de carbono. Molhabilidade. Resina epóxi. Rugosidade.

### Introdução

Os materiais compósitos podem ser descritos como a união de dois ou mais materiais, cujas propriedades combinadas diferem significativamente das propriedades dos materiais que os compõem individualmente e, diferentemente das ligas metálicas, mantêm-se em fases distintas, resultando em uma estrutura única (Newell, 2010) que reúne as propriedades desejáveis de cada componente para criar um material com desempenho otimizado (Shackelford, 2008).

Assim como os compósitos, as juntas híbridas são formadas pela união de dois ou mais materiais. Em termos gerais, uma junta híbrida é uma solução técnica que tem como objetivo unir componentes ou materiais diferentes por meio de uma combinação de metodologias (Monteiro, 2016).

A criação de estruturas híbridas de metal-compósito é uma demanda em ascensão, particularmente em setores que necessitam de materiais leves e duráveis. A fusão de metais, caracterizados pela sua alta resistência e ductilidade, com compósitos, reconhecidos pela sua leveza e resistência específica, dá origem a componentes com características aprimoradas (Callister, 2012). Contudo, a combinação de materiais distintos traz desafios técnicos que justificam uma análise detalhada de seu comportamento, particularmente no que diz respeito à adesão e à resistência das interfaces.

Portanto, a presente pesquisa tem por objetivo alterar a superfície metálica através da texturização em três condições distintas, testar a rugosidade das superfícies modificadas, verificar a molhabilidade das superfícies por meio do teste de ângulo de contato, fabricar o laminado para promover a adesão, avaliar a resistência da adesão realizando o teste de cisalhamento e analisar os resultados obtidos a fim de identificar a condição de texturização que proporciona o melhor desempenho.

### Metodologia

A preparação da superfície metálica é crucial para assegurar a excelência da interface dos materiais,

garantindo a remoção de impurezas e possíveis contaminações que afetariam diretamente o lixamento eficiente e homogêneo. Então, após a limpeza adequada com álcool, executou-se manualmente um lixamento linear uniforme em todas as peças, aplicando água para resfriar a superfície e minimizar o pó. Posteriormente, as peças foram limpas novamente com algodão e álcool e levadas ao microscópio para averiguar a uniformidade e detectar se ainda existiam possíveis falhas, como riscos ou irregularidades. Caso não estivessem com o acabamento esperado, o processo era repetido até atingir o nível de suavidade desejado.

Com as superfícies devidamente lixadas, o lado da peça que ia passar pela texturização foi engolfado no álcool para limpar quaisquer tipos de impurezas e secado devidamente com papel. Visando a criação de padrões microestruturais no plano para aumentar a área superficial e a rugosidade, as peças foram divididas em três condições (1, 2 e 3) com replicação igual a três, sendo cada amostra identificada pelas letras A, B e C e texturizadas com diferentes parâmetros até a obtenção da rugosidade desejada.

As texturizações tinham a mesma dimensão de área de  $25 \times 25 \text{ mm}^2$  e utilizou-se a potência do laser em 80%, velocidade de varredura igual a 50 mm/s e frequência de 10 kHz para todas as peças, sendo dessemelhante a quantidade de vezes que o laser foi passado e as divisões das grades dentro da área. Para a condição 1 foram 5 repetições de 50 linhas verticais e 25 linhas horizontais, enquanto que para a condição 2 transcorreu 10 vezes de 20 linhas horizontais e 20 verticais e, por fim, a terceira teve uma sequência de 15 passadas com a mesma grade da segunda.

Em seguida, para verificar as variações de relevo na superfície rugosa utilizando as duas diagonais, levou-se as peças ao rugosímetro da marca Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+ que utiliza uma sonda que percorre a superfície a ser medida, registrando as variações de altura ao longo do percurso e disponibilizando a rugosidade média Ra e a rugosidade média Rz, que foram usadas como base para o teste de molhabilidade e, posteriormente, a adesão,

Com o objetivo de avaliar a interação entre uma

superfície sólida e um líquido por meio da medição do ângulo de contato, as peças inicialmente foram higienizadas e, posteriormente, com um dosador preciso, colocou-se uma gota de água na superfície metálica rugosa de forma que mantivesse seu volume controlado para minimizar os efeitos da gravidade e assegurar a uniformidade na formação da gota.

Utilizando o goniômetro, foi capturada uma imagem lateral da gota sobre a superfície sólida por meio de uma câmera de alta resolução. Em seguida, a imagem foi analisada pelo *software* que determinou o ângulo de contato estático.

Por fim, aplicou-se o método de Zisman para definir a energia crítica de superfície. A partir do ângulo de contato medido, traçou-se um gráfico entre o cosseno do ângulo de contato e a tensão superficial da água. A extrapolação desse gráfico até o ponto em que o cosseno do ângulo de contato é igual a 1, molhabilidade total, permite determinar a energia crítica de superfície do material metálico, sendo uma técnica confiável para determinar a compatibilidade de materiais em processos que dependem de molhabilidade e adesão.

Antes de iniciar o processo de fabricação por infusão a vácuo, as peças foram colocadas em uma lavadora ultrassônica durante 60 minutos, para uma etapa de limpeza mais profunda, essencial para remover qualquer resíduo metálico, oxidação ou particulado microscópico e evitar interferências indesejadas na interação entre o metal e o compósito. Após estarem devidamente limpas, deu-se início a criação da junta híbrida.

Primeiramente, cortou-se a fibra de carbono de 0,3mm de espessura em 20 tiras de tamanho 100x25mm. Em seguida, passou-se o desmoldante sobre o molde com um papel e o *tacky tape* circulou a área para fazer a vedação. As peças metálicas foram colocadas junto com outras peças de alumínio e 10 tiras de carbono de forma centralizada em cima do peel ply de 38x32mm, com as partes texturizadas que iam sofrer a adesão voltadas para dentro, e as outras 10 tiras de tecido bidirecional de fibra de carbono foram posicionadas sobre os metais. Por cima, vieram uma camada de peel ply novamente e flow media dos mesmos tamanhos do primeiro.

Em pontas opostas, posicionou-se duas conexões onde foram colocadas spiradutos voltados para dentro e mangueiras cristalinas anexadas a registros de plásticos que, por onde entrou a resina, estava ligado a outra mangueira saindo de um funil, enquanto a outra, que por onde saía a resina, levava a um tanque de pressão conectado a um compressor de ar.

Para o fechamento da bolsa de vácuo, utilizou-se o filme de vácuo cuidadosamente colado a

fita *tacky tape*, apertando até que não houvesse nenhum barulho de saída de ar auxiliado através do compressor de ar.

Após garantir que o processo de fabricação estivesse devidamente pronto, fez-se a mistura de resina com o endurecedor que, para cada medida da resina, usava o dobro de endurecedor, no experimento foram utilizados 125 mL de resina e 250 mL de endurecedor. Os registros foram abertos e a mistura foi adicionada calmamente ao funil.

Por fim, esperou-se o tempo de cura das peças para cortá-las adequadamente para efetuar o teste de cisalhamento seguindo as condições da norma ASTM D3165-07.

Com o paquímetro mediou-se a largura e o comprimento para o cálculo da área da superfície de contato, em seguida foi realizado o teste de cisalhamento, onde os corpos de prova foram submetidos à força de corte em uma máquina de ensaio mecânico a uma taxa de carregamento de 1,27mm/min.

### Resultados e discussão

Com a realização do teste de rugosidade, obteve-se a rugosidade Ra, medida do comprimento médio entre picos e vales, e a rugosidade Rz, que mede a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais baixo. Assim, analisou-se que a condição 1 possui um grau de rugosidade muito mais elevado em comparação às outras condições, em consequência dos parâmetros utilizados para a texturização, sendo seguida pela condição 2 e, por último, a condição 3, como mostrado na Tabela 1. Ainda observa-se que a rugosidade Rz é inconclusiva devido ao desvio padrão discrepante.

Tabela 1 - Média e desvio padrão da rugosidade Ra e Rz.

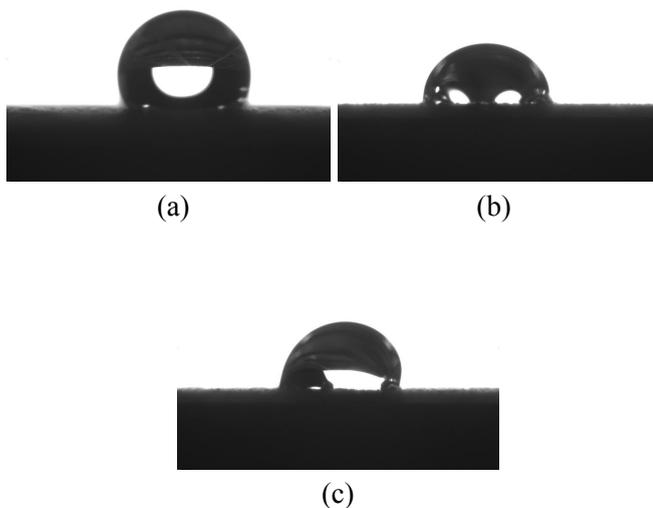
Condição	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )
1	16,71 $\pm$ 1,23	79,33 $\pm$ 7,68
2	11,42 $\pm$ 1,94	69,30 $\pm$ 16,12
3	8,93 $\pm$ 0,73	53,50 $\pm$ 5,75

Após, efetuou-se o teste da gota e concluiu-se que a condição 1 possui o maior ângulo de contato, Figura 1(c), portanto é uma superfície hidrofóbica por ter o ângulo maior que 90°, enquanto que a condição 2, apesar de ter um ângulo menor em comparação com a 1, Figura 1(b), também possui uma superfície hidrofóbica e, por último, a condição 3 com o menor ângulo de contato e uma superfície hidrofílica por possuir ângulo menor que 90°, Figura 1(a).

Tabela 2 - Média e desvio padrão do ângulo de contato médio.

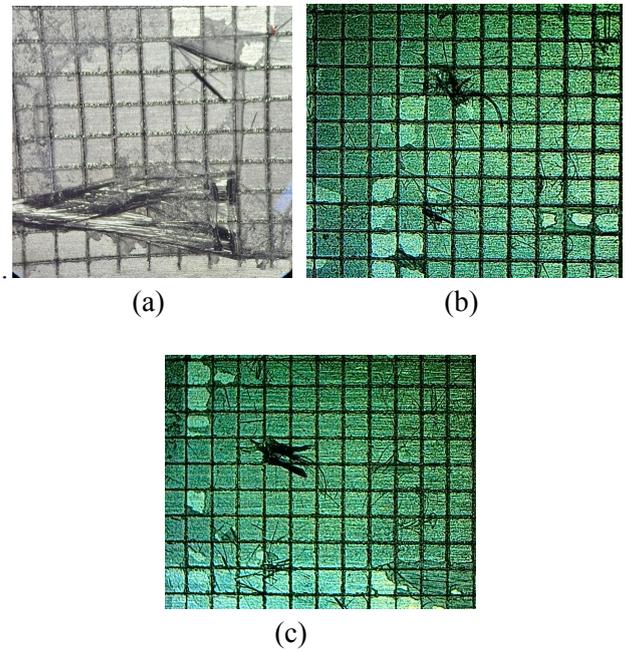
Condição	$\theta$ (M) [graus]
1	$102,3 \pm 0,35$
2	$98,9 \pm 0,41$
3	$67,0 \pm 0,19$

Figura 1 – Teste da gota na condição 1 (a), 2 (b) e 3 (c).



também foi possível observar falhas adesivas na superfície metálica.

Figura 2 - Falha adesiva nas interfaces da condição 1 (a), condição 2 (b) e condição 3 (c).



Com os valores obtidos na execução do teste de cisalhamento, encontrou-se na Tabela 3 a média da resistência ao cisalhamento interlaminar para todas as condições, com a condição 3 possuindo a maior resistência.

Tabela 3 - Média e desvio padrão da tensão cisalhante.

Condição	$\tau$ (Mpa)
1	$4,81 \pm 1,72$
2	$3,23 \pm 0,72$
3	$5,08 \pm 0,77$

Ao final, foi possível visualizar os modos de falha presentes nas juntas híbridas. Como teve uma pequena quantidade de compósito presente na interface da condição 1, Figura 2 (a), subentende-se que apesar de existir pequenos pontos de falha coesiva, onde a ruptura ocorre na camada do adesivo, a predominância é da falha adesiva que acontece entre o adesivo e o substrato, mostrando que a adesão na interface de algum material não foi forte o suficiente para suportar a ruptura. Na condição 2, Figura 2 (b) e condição 3, Figura 2 (c)

A delaminação é uma falha interlaminar que ocorre quando as camadas de um material compósito se separam, causado por um problema oriundo do processamento, que acarretou em defeito por porosidades e vazios provocados por falta de resina, e resulta na perda da integridade estrutural, sendo um dos modos de falha mais críticos em compósitos laminados. Ela pode ser observada na Figura 5, onde o compósito da condição 2 sofre a falha.

Figura 5 - Delaminação no compósito da condição 2.



## Conclusões

Foram avaliadas três distintas condições de texturização, com a condição 1 apresentando a maior rugosidade e o maior ângulo de contato e a condição 3 exibindo a menor aspereza e propriedades hidrofílicas. No teste de cisalhamento obteve-se valores intermediários, onde notou-se uma falha adesiva nas interfaces da condição 1, 2 e 3, uma pequena falha coesiva na condição 1 e uma falha por delaminação nos compósitos da condição 2, que fez com que a adesão não fosse bem sucedida. Conclui-se, portanto, que é necessário melhorar o processo de fabricação do laminado visto que as falhas impediram a avaliação adequada da junta híbrida.

## Agradecimentos

Agradeço a Universidade Federal de Itajubá, pela concessão da bolsa de Iniciação Científica, e a minha orientadora doutora Renata Neves Penha, pelo suporte, orientação e estímulo ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Estendo o agradecimento a todo apoio, infraestrutura e recursos disponibilizados pela instituição. Por fim, agradeço especialmente a minha família e aos meus amigos, pelo amparo incondicional e incentivo ao longo do período de pesquisa.

## Referências

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

LEVY NETO, Flaminio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 01 out. 2024.

MONTEIRO, Elvis. **Desenvolvimento e análise de adesivos nanomodificados por nanotubos de carbono**. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

NEWELL, James. **Fundamentos da Moderna Engenharia e Ciência dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2010. E-book. ISBN 978-85-216-2490-5. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2490-5/>. Acesso em: 01 out. 2024.

SHACKELFORD, James. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

VENTURINI, S. N. **Estudo de junções aeronáuticas híbridas (metal-compósito) unidas mecanicamente**. 2010. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/c4c7/46d4debec716070a93ca65058395fe90fd75.pdf>. Acesso em: 02 out. 2024.