

DETECÇÃO DE DESGASTE EM FERRAMENTAS REVESTIDAS COM ta-C DURANTE FRESAMENTO DE LAMINADOS HÍBRIDOS Al/CFRP/Al E CFRP/Al/CFRP USANDO ANÁLISE VIBRACIONAL

RITA DE CÁSSIA MENDONÇA SALES CONTINI¹; FRANCISCO JOSÉ GOMES DA SILVA²

¹Fatec –SJC Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos, Professor Jessen Vidal, Centro Paula Souza, São José dos Campos, São Paulo, Brazil.

²CIDEM-ISEP, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Instituto Politécnico do Porto, Porto, Portugal.
rita.sales@fatec.sp.gov.br

Wear Detection of ta-C coated Tools during Milling of Al/CFRP/Al and CFRP/Al/CFRP Hybrid Laminates using Vibrational Analysis

Eixo Tecnológico: *Produção Industrial*

Resumo

Recentemente, a indústria aeronáutica tem desenvolvido materiais que apresentam uma boa relação entre leveza e alto desempenho. Os materiais compósitos são aqueles que atendem plenamente a esse requisito. Dentre os materiais compósitos, destacam-se os materiais laminados de fibras metálicas, porém o processo de fresamento desses multimateriais não é uma tarefa fácil devido à natureza individual de cada material. A má escolha de parâmetros e ferramentas de fresamento pode causar danos à peça, e estas devem ser descartadas, gerando altos custos para a empresa. Para ter um processo de fresamento bem ajustado para esses multimateriais, é necessário monitorar os sinais de vibração durante o processo de usinagem para entender a influência dos parâmetros e ferramentas durante o processo de fresamento. Portanto, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de duas ferramentas diferentes (2 e 3 canais) revestidas com carbono duro amorfo tetraédrico (ta-C) durante o fresamento de laminados de CFRP/Al/CFRP e em Al/CFRP/Al em ambiente seco. A análise de vibração foi considerada em relação ao desgaste da ferramenta. A morfologia do desgaste das ferramentas no processo de fresamento foram analisados por microscopia óptica. Os resultados de desgaste da ferramenta medidos mostraram um aumento do desgaste na superfície com o aumento da velocidade de corte. Neste trabalho são apresentados resultados parciais obtidos durante a internacionalização do projeto pesquisa em RJI desenvolvido em parceria com o ISEP- IPP, Porto, Portugal.

Palavras-chave: *Laminados Fibra Metal, Multimateriais, Fresamento, Comportamento de desgaste, Análise vibracional.*

Abstract

Recently, the aeronautical industry has developed materials that have a good relationship between lightness and high performance. Composite materials are those that fully meet this requirement. Among the composite materials, laminated materials made of metallic fibres stand out, but the milling process of these multi-materials is not an easy task due to the individual nature of each material. Poor choice of parameters and milling tools can cause damage to the part, and these must be discarded, generating high costs for the company. To have a well-adjusted milling process for these multi-materials, it is necessary to monitor vibration signals during the machining process to understand the influence of parameters and tools during the milling process. Therefore, this work aims to evaluate the performance of two different tools (2 and 3 flutes) coated with tetrahedral amorphous hard carbon (ta-C) during the milling of CFRP/Al/CFRP and Al/CFRP/Al stacks in a dry environment. Vibration analysis were considered for tool wear. Tool wear morphology in the milling process were analyzed by optical microscopy. The tool wear results measured showed an increase in wear on the surface with the increase in cutting speed. This paper presents partial results obtained during the internationalization of the RJI research project developed in partnership with ISEP-IPP, Porto, Portugal.

Keywords: *Fiber metal laminates, Multimaterials, Milling, Wear behaviour, Vibrational analysis.*

1. Introdução

As empresas estão sendo impulsionadas em direção à transformação digital para atender à crescente demanda por produtos personalizados, o que leva ao aumento da concorrência e a

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

uma maior ênfase em serviços rápidos e ágeis. Avanços recentes em soluções de hardware e software, incluindo plataformas de hardware e rede mais potentes, além de sensores e atuadores mais econômicos e eficientes, aceleraram essa transição. Esses elementos se unem para formar a ideia recentemente articulada de "Indústria 4.0", que visa automatizar e digitalizar a produção [1]. Em seus estudos, Sahin et al [1] discutiram o uso de sensores, uma abordagem integrada de análise de dados e uma plataforma de interface homem-máquina para coletar dados durante o processo de fabricação e antecipar ações por meio de alertas enviados quando valores críticos são excedidos durante o processo de usinagem.

Recentemente, tem havido considerável interesse em pesquisas no desenvolvimento do processo de usinagem assistida por vibração de materiais de alto desempenho para fornecer benefícios significativos em termos de produtividade e acessibilidade para medições in situ em manufatura enxuta [2]. Os principais desafios residem no processo de usinagem de laminados multimateriais e algumas soluções propostas estão sendo investigadas [3].

Esses multimateriais estão sendo utilizados na produção de veículos com eficiência energética para as indústrias aeroespacial e automobilística devido às suas propriedades de alto desempenho, como durabilidade, leveza, alto desempenho, resistência à fadiga e resistência à corrosão [4]. Esses requisitos levaram ao surgimento de materiais compósitos híbridos, ou multimateriais, que são laminados de fibras metálicas (*Fiber Metal Laminate – FML*) geralmente utilizados em fuselagens de aeronaves e peças de reposição [5-7].

Para que esses materiais sejam utilizados, após o processo de fabricação para aquisição de peças estruturais, eles devem passar pelo processo de acabamento, ou seja, por processos de usinagem. Devido à natureza heterogênea dos multimateriais, o processo de usinagem pode ser um problema. Os problemas mais comuns encontrados durante a usinagem de estruturas multimateriais são (i) danos/delaminação do material compósito, (ii) a alta força de empuxo, (iii) a adesão da camada metálica à aresta de corte da ferramenta [8] e, finalmente, (iv) a alta temperatura desenvolvida na operação de usinagem [9].

Para minimizar esses efeitos, é necessário realizar a escolha correta dos insumos e ferramentas utilizados durante o processo de usinagem, a fim de possibilitar a otimização dos parâmetros, visando à redução dos custos operacionais com vida útil da ferramenta e dos equipamentos. Devido à heterogeneidade das propriedades mecânicas dos componentes constituintes dos multimateriais, é necessário escolher uma ferramenta com geometria e propriedades mecânicas da ferramenta e do revestimento adequadas para o fresamento desses materiais [10], pois, quando associadas a uma má escolha das condições, as ferramentas de corte podem não apenas gerar desgaste prematuro da ferramenta de corte, mas também causar sérios danos à peça [11].

Para entender quando ocorrem falhas tanto na ferramenta quanto em multimateriais durante o fresamento, todo o processo deve ser monitorado e, para isso, é possível utilizar a análise do processo de usinagem assistida por vibração. Durante o processo de usinagem, as vibrações são altamente indesejáveis, pois afetam negativamente a qualidade da superfície, limitam a precisão dimensional da peça, levam a maiores taxas de desgaste da ferramenta, criam altos níveis de ruído e podem resultar em danos à própria ferramenta ou ao fuso [12].

Chibane et al [13] caracterizam as condições de corte usando análise de vibração para evitar os defeitos (mencionados acima) em um material compósito carbono/epóxi (T800S/M21). Na avaliação experimental, eles estudaram os seguintes parâmetros: velocidade de corte, profundidade de corte e avanço por revolução, e os níveis de vibração foram medidos para cada caso. Eles utilizaram métodos como Regressão Linear Múltipla (MLR) e Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) para criar modelos matemáticos utilizando os dados

experimentais. Os resultados mostram que as vibrações RMS são influenciadas apenas pela interação entre taxa de avanço e profundidade de corte.

Portanto, o principal objetivo deste trabalho é avaliar a usinabilidade do multimaterial CRFC/Al/CRFC e de Al/CRFC/Al por meio de processos de fresamento e compreender o processo de desgaste da ferramenta de corte durante o processo de fresamento por meio de análise vibracional, entendendo a influência dos parâmetros de usinagem escolhidos na vida útil da ferramenta e, assim, possibilitando a otimização da vida útil da ferramenta.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

As matérias-primas utilizadas para a fabricação dos laminados FML foram: a) tecido de fibra de carbono Twill 2x2 (espessura = 0,28 mm, dtex = 3K, 240 g/m², Torayca™), b) sistema de resina epóxi e agente de cura (SR Green Epoxy 33/ SZ 8225, fabricante: Sicomin, França) e c) lâmina de Al 2024 T3 (espessura = 1,5 mm ABS_5044D/ Fabricante: AMAG Group, Áustria).

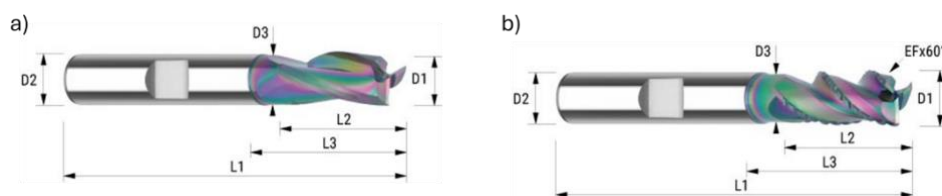
Para fabricar o laminado FML CRFC/Al/CRFC com espessura de 5 mm e sequência de empilhamento foi de [(0/90)₇ /Al/ (0/90)₇] e para fabricar o laminado FML Al/CRFC/Al com espessura de 5 mm a sequência de empilhamento foi de [Al/ (0/90)₇/Al].

Para o processo de cura dos multimateriais, os laminados foram inseridos em um saco a vácuo e submetidos ao processo de moldagem por compressão a quente. Para isso, foi utilizada uma prensa hidráulica Lab Econ 600 com aquecimento de até 400 °C, capacidade de 600 kN e sistema de resfriamento a água (fabricante: Fontijne Presses, Holanda). Após a fabricação, o FML foi submetido ao processo de acabamento para remoção do excesso de material.

2.2. Metodologia

Para a usinagem de multimateriais, ferramentas de fresadora de metal duro sólidas revestidas com ta-C (carbono amorfo tetraédrico) foram testadas com dois tipos diferentes de hélices: i) Ferramenta 2413.060.00 com 3 canais, ângulo de hélice 38°, 40°, 42°, dureza: 6000 HV, perfil de desbaste tipo WR (Fig. 1. a) e ii) uma fresa trocoidal com 2 canais (Fig. 1. b), ângulo de hélice 20°, dureza: 6000 HV, ambas da Inovatools (Leiria, Portugal). As propriedades das ferramentas são mostradas na Tab. 1.

Fig. 1. Vista lateral da ferramenta de corte com dimensões: a) Fresa trocoidal 590 e b) Fresa quebra-cavacos 2413.



Tab. 1. Tipo, designação, revestimento e propriedades das ferramentas.

Tipo de Ferramenta	Designação	Revestimento	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Canais
Trocoidal	590	taC	6	6	5.70	64	16	21	2
Quebra-cavaco	2413	taC	6	6	5.70	57	14	20	3

Os ensaios de usinagem foram realizados considerando os parâmetros apresentados na Tab. 2. O processo de fresamento foi realizado em condições a seco.

Tab. 2. Parâmetros de processo usados durante o processo de fresamento dos FMLs.

Designação da ferramenta	Vc [m/min]	fz [mm/tooth]	Cut length [mm]	Ae [mm]	Ap [mm]	Rotação [rpm]
590V140 2413V140	140	0.05	4000	4	5	7468,00
590V180 2413V180	180	0.05	4000	4	5	9549,50

Fig. 2. Configuração de usinagem de fresamento: a) acelerômetro triaxial e b) Laminado FML.



O processo de fresamento foi realizado utilizando um centro de usinagem CNC de 5 eixos HAAS VF-2 (HAAS Automation, Oxnard, CA, EUA), com velocidade máxima de 10.000 rpm e potência máxima de 20 kW, pertencente aos laboratórios do ISEP/P.Porto (Portugal). Como pode ser observado na Fig. 2, a ferramenta foi posicionada para realizar o processo de fresamento lateral.

Para conhecer a influência dos parâmetros de usinagem na vida útil da ferramenta, o acelerômetro triaxial PCB-PIEZOTRONICS modelo 356A15 foi acoplado a uma placa de aquisição de dados National Instruments modelo USB-4431, que permitiu o registro do sinal de vibração desenvolvido nos eixos X, Y e Z usando o software Lab View. O equipamento foi acoplado ao fuso do centro de usinagem CNC (Fig. 2). A aceleração RMS (*Root Mean Square*) foi calculada (usando o sinal de tempo de vibração) para cada teste. Para considerar a orientação da fibra do compósito, a vibração RMS média medida nas três direções X, Y e Z foi determinada de acordo com a seguinte Eq. (1) [13]:

$$A_{rms} = \sqrt{Ax_{rms}^2 + Ay_{rms}^2 + Az_{rms}^2} \quad (1)$$

Após os ensaios de usinagem, foram realizadas análises da influência dos parâmetros de usinagem na qualidade da vida útil das ferramentas. As ferramentas foram submetidas a técnica de microscopia óptica para identificar os mecanismos de desgaste na superfície. Para tanto, utilizou-se a técnica de microscopia óptica, utilizando um microscópio digital Dino-Lite® Edge - modelo WF4915ZT - sem fio (zoom de 220x). As medições de desgaste das ferramentas foram realizadas de acordo com a norma ISO 8688-2:1986 [14].

3. Resultados e Discussão

3.1 Análise vibracional de ensaios de usinagem de laminados de CFRP/Al/CFRP

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

A Fig. 3 mostra a vista lateral e a vista superior do laminado de fibra de carbono (FML) obtido pela combinação de dois processos: laminação manual e moldagem por compressão a quente. O laminado é composto por duas camadas de fibra de carbono com espessura aproximada de 1,5 mm cada e uma camada de alumínio com espessura de 1,5 mm.

Fig. 3. a) Vista superior e lateral laminado CFRP/Al/CFRP e b) Vista superior e lateral do laminado Al/CFRP/Al.

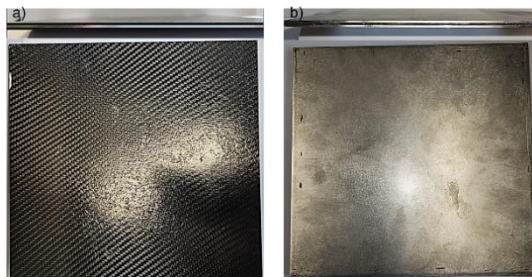
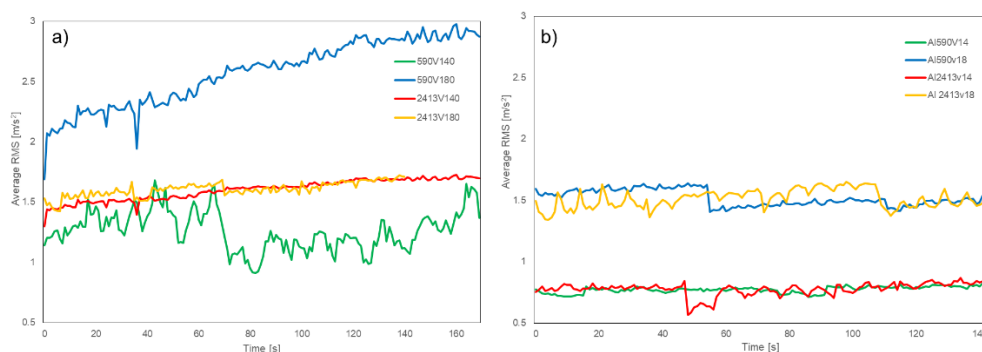


Fig.4. Evolução média do RMS em função do tempo relativa obtida durante o processo de fresamento de laminados utilizando as ferramentas 590 e 2413 e velocidades de corte de 140 m/min e 180 m/min: a) CFRP/Al/CFRP e b) Al/CFRP/Al.



Utilizando os sinais dos eixos X, Y e Z capturados pelo acelerômetro triaxial, o RMS médio obtido é mostrado na Fig. 4. Durante o processo de fresamento do laminado CFRP/Al/CFRP (Fig. 4.a), a ferramenta CFRP590V180 apresentou um aumento na amplitude ao longo do tempo quando comparada à mesma ferramenta submetida à menor velocidade de corte. Isso indica que o desgaste na ferramenta 590V180 foi mais intenso do que na 590V140. Além disso, o RMS médio da ferramenta CFRP590V140 teve um sinal estável, indicando que o desgaste da ferramenta foi constante do início ao fim do processo de fresamento. A diferença entre os sinais foi de quase 51%. Ainda na Fig. 4.a, o sinal RMS médio para a ferramenta CFRP2413V180 aumentou no primeiro período em relação a um comprimento de corte de 1 m e teve uma diminuição após 2 m até 4 m devido ao desgaste severo na aresta de corte da ferramenta, como remoção de revestimento e uma ponta de trinca na aresta de corte da ferramenta (Tab. 3). O sinal RMS médio do CFRP2413V140 apresenta um ligeiro aumento de acordo com o aumento do desgaste da ferramenta. Comparando o sinal RMS médio com as mesmas ferramentas, mas com velocidades de corte diferentes, a diferença entre os sinais foi de quase 0,36%.

Durante o processo de fresamento do laminado Al/CFRP/Al (Fig. 4.b), as ferramentas submetidas a velocidades de corte mais altas, Al590V180 e Al2314V180, apresentaram um aumento na amplitude ao longo do tempo em comparação com a mesma ferramenta submetida a velocidades de corte mais baixas. Isso indica que o desgaste da ferramenta foi mais severo do que o da ferramenta submetida a velocidades de corte mais baixas. Comparando o valor médio do sinal de vibração na velocidade de corte mais alta com o da ferramenta correspondente na

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

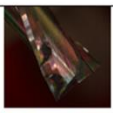
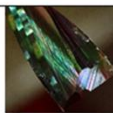
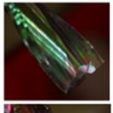
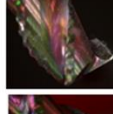
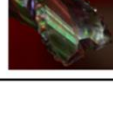
velocidade de corte mais baixa, os sinais das ferramentas Al590V140 e Al2314V140 são 49,14% e 48,65% menores, respectivamente.

A Tab. 3 apresenta as dimensões médias de desgaste na superfície da ferramenta obtidas usando a técnica de microscopia óptica. Pode ser observado em ambas as ferramentas que o desgaste da ferramenta aumenta com o aumento da velocidade de corte, corroborando com os resultados apresentados na Fig. 4. Para os laminados estudados, as dimensões de desgaste da ferramenta 2413 são menores do que aquelas encontradas na 590. A ferramenta 2413 é considerada um projeto quebra-cavaco porque contém três ângulos de hélice diferentes: 38°, 40° e 42°, adicionando um perfil de desbaste na superfície de saída da ferramenta perto das arestas de corte, com uma aparência semelhante a vales e picos. Assim, durante o processo de fresamento dos laminados, apenas os vales entram em contato com o material submetido ao processo de abrasão, apresentando valores menores do que a ferramenta 590, como pode ser observado na Tab. 3.

Durante a usinagem do laminado CFRP/Al/CFRP, as ferramentas 590 apresentaram desgaste abrasivo na região de contato com a camada composta durante o processo de usinagem, gerando uma profundidade de desgaste de 0,11 mm na região composta em relação à camada de alumínio, indicando que o material composto é mais abrasivo que o alumínio (Tab. 3). A natureza abrasiva do CFRP intensificou a força de corte, aumentando o desgaste da aresta de corte [15].

Para o laminado Al/CFRP/Al observou-se uma profundidade de desgaste de 0,15 mm na região do compósito em comparação com a região da camada de alumínio, indicando que o material compósito é mais abrasivo do que o alumínio. As ferramentas 590 apresentaram desgaste abrasivo na área onde a ferramenta estava em contato com a camada de compósito durante o processo de usinagem (Tab.3). O desgaste da aresta de corte aumentou devido ao aumento da força de corte causada pela natureza abrasiva do CFRP [15-17]. Para ambos laminados, observa-se depósito de material compósito na superfície da ferramenta na região de usinagem do CFRP. Quando a velocidade de corte aumenta, o depósito de CFRP aumenta de tamanho e a força centrífuga não é suficiente para remover completamente o material. Na ferramenta 2413, isso não acontece, pois o CFRP é quebrado e transformado em pó.

Tab. 3. Comprimento médio das dimensões de desgaste da ferramenta na superfície da ferramenta e imagens capturadas pela técnica de microscopia óptica das ferramentas 590 e 2413 submetidas a uma velocidade de corte de 140 m/min e 180 m/min após o processo de fresamento dos laminados CFRP/Al/CFRP e Al/CFRP/Al.

CFRP/Al/CFRP			Al/CFRP/Al		
Designação da ferramenta	Comprimento médio do desgaste da ferramenta [mm]	Imagem	Designação da ferramenta	Comprimento médio do desgaste da ferramenta [mm]	Imagem
CFRP590V140	2,25±0,45		Al590V140	2,24±0,12	
CFRP590V180	2,27±0,38		Al590V180	2,57±0,14	
CFRP2413V140	0,47±0,13		Al2413V140	0,61±0,15	
CFRP2413V180	0,64±0,29		Al2413V180	0,71±0,16	

4. Considerações finais

Este estudo utilizou análise de vibração para avaliar o desempenho de duas ferramentas distintas — de dois e três canais — revestidas com carbono duro amorfo tetraédrico (ta-C) na fresagem em laminados de CFRP/Al/CFRP e de Al/CFRP/Al em ambiente seco. O exame das dimensões de desgaste da ferramenta durante o processo de fresamento FML foi realizado utilizando a abordagem de microscopia óptica.

A análise vibracional do desgaste das ferramentas 590 e 2413 revelou um aumento no desgaste na superfície da aresta de corte da ferramenta com o aumento da velocidade de corte, sugerindo um pequeno aumento na amplitude média.

O desempenho da ferramenta 590 de 2 canais permaneceu o mesmo, apesar do aumento da amplitude média com o aumento da velocidade. Observou-se uma queda no sinal para a ferramenta 590, causada por lascamento irregular na superfície de ataque

A ferramenta 2413, de 3 canais, por outro lado, apresentou um aumento no desgaste da superfície com o aumento da velocidade de corte, indicando um ligeiro aumento na amplitude média nos primeiros metros e, em seguida, uma diminuição no sinal de vibração, após uma quebra de aresta.

Após a análise de todos os dados, observou-se que a ferramenta com melhor desempenho para usinagem de laminados FML foi a 590 devido a sua resistência ao desgaste.

Este projeto contribui para o desenvolvimento da sociedade no âmbito CPS e Fatec-SJC no seguintes itens: 1) Promoção da internacionalização dos docentes em RJJ, 2) Consolidação da parceria formada entre o CPS e ISEP/ P.Porto, 3) Internacionalização de discentes, 4) Desenvolvimento do conhecimento na área de usinagem de materiais avançados agregando a linha de pesquisa da docente já existente e 5) Estabelecimento do grupo de pesquisa na área de materiais avançados.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Paula Souza–FATEC/SJC-Brasil, ao IPP-CIDEM/ISEP-Portugal, ao INEGI e à FEUP pelo apoio institucional. Os autores também agradecem a Ricardo Alexandre, da empresa INOVATOOLS, pela disponibilidade em fornecer gratuitamente as ferramentas utilizadas neste trabalho, bem como a Victor Moreira pela colaboração em ensaios de usinagem. O trabalho é desenvolvido no âmbito do projeto de investigação “DRIVOLUTION — Transição para a fábrica do futuro”, com a referência DRIVOLUTION C644913740-00000022, apoiado por Fundos Europeus Estruturais e de Investimento no âmbito do programa “Portugal2020”.

Referências

- [1] SHAHIN, M., CHEN, F.F., BOUZARY, H., KRISHNAIYER K. Integration of Lean practices and Industry 4.0 technologies: smart manufacturing for next-generation enterprises. **Int. J. of Adv. Manufac. Techn.**, v. 107, p. 2927–2936, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05124-0>
- [2] KUO C., WANG C., LIU M., Interpretation of force signals into mechanical effects in vibration-assisted drilling of carbon fibre reinforced plastic (CFRP)/aluminium stack materials, **Compos. Struc.**, v. 179, p. 444-458, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.07.077>
- [3] KRISHNARAJ, V., ZITOUNE, R., COLLOMBET, F. Comprehensive review on drilling of multi-material stacks. **J. Mach. and Form. Techn.**, v. 2, n. (3-4), p. 1-32, 2010.

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJI

- [4] BANE M.D., ROSIOARA M., CARBAS, R.J.C., DA SILVA, L.F.M., Multi-material adhesive joints for the automotive industry. **Compos. Part B: Eng.**, v. 151, n.15, p. 71-77, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.009>
- [5] BOLAR G, SRIDHAR A.K., RANJAN A. Drilling and helical milling for hole making in multi-material carbon reinforced aluminum laminates. **Int. J. of Lightw. Mat. and Manufac.**, v. 5, n.1, p. 113-125, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2021.11.004>
- [6] KUO C.L., SOO S.L., ASPINWALL D.K., et al. The effect of cutting speed and feed rate on hole surface integrity in single-shot drilling of metallic-composite stacks. **Procedia CIRP**, v.13, 405e410, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.069>
- [7] GIASIN K., AYVAR-SOBERANIS S., HODZIC A. An experimental study on drilling of unidirectional GLARE fibre metal laminates, **Compos. Struct.** v. 133, 794e808, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.007>
- [8] ZITOUNE R., KRISHNARAJ V., COLLOMBET F., LE ROUX S. Experimental and numerical analysis on drilling of carbon fibre reinforced plastic and aluminium stacks. **Compos. Struct.**, v.146, p. 148-158, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.084>
- [9] PAWAR O.A., GAIKHE Y.S., TEWARI A., et al. Analysis of hole quality in drilling GLARE fiber metal laminates, **Compos. Struct.**, v.123, p. 350-365, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.056>
- [10] DAVIM J.P., REIS, P. Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments. **Compos. Struct.**, v. 59, n.4, p. 481-487, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00257-X](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00257-X)
- [11] KHASHABA UA. Delamination in drilling GFR-thermoset composites. **Compos. Struct.**, v. 63, n. 3-4, p. 313-327, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(03\)00180-6](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(03)00180-6)
- [12] DIMAROGONAS AD., HADDAD SD. **Vibration for Engineers**, Prentice Hall, Englewood cliffs, New Jersey, 1992.
- [13] CHIBANE H., MORANDEAU A., SERRA R., BOUCHOU A., LEROY R., Optimal milling conditions for carbon/epoxy composite material using damage and vibration analysis. **Int J Adv Manuf Techn.** v.68, p. 1111-1121, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4903-3>
- [14] ISO 8688-2. Tool life testing in milling - Part 2: End milling. International Organization for Standardization, Switzerland, 1989.
- [15] COSTA RDFS, SALES-CONTINI RCM, SILVA FJG, SEBBE N, JESUS AMP. A Critical Review on Fiber Metal Laminates (FML): From Manufacturing to Sustainable Processing. **Metals**, v.13, n.4, p. 638, 2024. <https://doi.org/10.3390/met13040638>
- [16] OZKAN D, PANJAN P, GOK MS, KARAOGLANLI AC. Experimental Study on Tool Wear and Delamination in Milling CFRPs with TiAlN- and TiN-Coated Tools. **Coatings**. v.10, n.7, p.623, 2020. <https://doi.org/10.3390/coatings10070623>
- [17] D'ORAZIO A., EL MEHTEDI M., FORCELLESE A., NARDINOCCHI A., SIMONCINI M., Tool wear and hole quality in drilling of CFRP/AA7075 stacks with DLC and nanocomposite TiAlN coated tools, **J. of Manuf. Proc.**, v.30, p.582-592, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.10.019>