

ANÁLISE DO PROCESSO DE FURAÇÃO DE COMPÓSITO DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO UTILIZADO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Marcel Yuzo Kondo

Emanuele Schneider Callisaya

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) – Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) – Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 - Portal das Colinas - Guaratinguetá/SP
marcel.kondo@unesp.br; schneider.callisaya@unesp.br

Michelle Leali Costa

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) – Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) – Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 - Portal das Colinas - Guaratinguetá/SP
Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) – Laboratório de Estruturas Leves (LEL) – São José dos Campos, Estrada Dr. Altino Bondensan, 500 - Distrito Eugênio de Melo, São José dos Campos – SP
mlcosta@ipt.br

Edson Cocchieri Botelho

Manoel Cléber de Sampaio Alves

Marcos Valério Ribeiro

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) – Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) – Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 - Portal das Colinas - Guaratinguetá/SP
edson.botelho@unesp.br; manoel.aves@unesp.br; marcos.valerio@unesp.br

Resumo: O uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica é bem conhecido, onde são utilizados em partes estruturais, reduzindo em até 20% o consumo de combustível devido a redução do peso total da aeronave com o cumprimento dos requisitos e esforços mecânicos. Recentemente, na busca por veículos mais leves e mais eficientes, a indústria automotiva busca implementar e utilizar os materiais compósitos em seus novos projetos, com a diferença de que peças automotivas precisam ser produzidas numa velocidade maior que peças para a indústria aeronáutica pela característica de produção em alta cadência. As peças de materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras são produzidas próximas das dimensões finais, sendo necessário o uso de processos de usinagem para se alcançar os requisitos dimensionais de projeto. Muitas dessas peças são montadas através de rebatamento ou aparafusamento, exigindo-se o uso de brocas e/ou fresas no processo de furação. Um dos principais defeitos que ocorrem neste processo é a delaminação na região de entrada e saída das ferramentas cortantes na peça que está sendo usinada, o que prejudica sua resistência mecânica, principalmente à fadiga. O objetivo deste trabalho foi estudar o processo de furação de um compósito de matriz polimérica termoplástica reforçada com fibra de carbono, analisando-se a influência da velocidade de corte, do avanço e de duas ferramentas diferentes sobre a potência de corte, na vibração do processo e no processo de delaminação do compósito. Utilizou-se um arranjo ortogonal de Taguchi L_{16} como planejamento experimental. A contribuição no fenômeno de delaminação do material da ferramenta de corte foi a maior (85,57 %), enquanto rotação e avanço tiveram contribuições respectivamente de 7,98 % e 5,87 %. Os parâmetros de menor delaminação foram obtidos com velocidade de corte de 150,80 m/min e avanço de 0,10 mm/rotação, utilizando-se ferramenta de metal duro revestido de TiAlN. Também foram obtidas as melhores condições de usinagem em relação aos parâmetros de saída analisados, potência de usinagem e vibração.

Palavras-chave: CFRP; Taguchi; Potência; Vibração; Delaminação

1. INTRODUÇÃO

O uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica é bem conhecido, onde são utilizados em partes estruturais, reduzindo em até 20 % o consumo de combustível devido a redução do peso total da aeronave com o cumprimento dos requisitos e esforços mecânicos (CAGGIANO, 2018; PANCHAGNULA e PALANIYANDI, 2018; GENG *et al.*, 2019, AHMAD *et al.*, 2019). Recentemente, na busca por veículos mais leves e mais eficientes, a indústria automotiva busca implementar e utilizar os materiais compósitos em seus novos projetos, com a diferença de que peças automotivas precisam ser produzidas numa velocidade maior que peças para a indústria aeronáutica pela característica de produção em alta cadência (KONDO *et al.*, 2022; MONTAGNA *et al.*, 2022). Um dos polímeros utilizados como matriz de compósitos poliméricos reforçados com fibra de carbono (CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer), com propriedades adequadas para o uso na indústria automotiva, é a poliamida 6 (PA6), também conhecido como Nylon 6. É utilizada

devido a sua durabilidade, resistência mecânica, estabilidade a temperaturas menores que 130° C, resistência à abrasão, estabilidade química e resistência a combustíveis, graxas e óleos, provendo também uma interessante relação de custo/benefício quando comparada a outros polímeros de engenharia de alto desempenho, tais como o PPS (sulfeto de polifenileno), PEEK (poliéter-éter-cetona), PAEK (poliariletercetona) e PEI (Polieterimida) (MCKEEN, 2019; TROUGHTON, 2009), tendo a vantagem também sobre polímeros termorrígidos por ser reciclável.

A usinagem de CFRP é um desafio, sendo objeto de estudo de muitos grupos de pesquisa como pode ser visto nos trabalhos de revisão de Aven *et al.*, 2021; Cepero-Mejías *et al.*, 2020; Khanna *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2021 e Gao *et al.*, 2022. Dureza, resistência à abrasão e baixa condutividade térmica reduzem a eficiência e a qualidade da usinagem de CFRP, acelerando também o desgaste da ferramenta. A má qualidade da usinagem leva à redução da resistência à fadiga das peças, ao comprometimento das estrutura e prejudica as tolerâncias de montagem (ZHANG; LU, 2018). A abrasividade dos constituintes de reforço, como a fibra de carbono, torna os materiais compósitos mais difíceis de usar do que os materiais metálicos tradicionais. A formação de cavacos também é diferente na usinagem de metais dúcteis e compósitos de matriz polimérica. Enquanto na usinagem de metais dúcteis resulta-se em cavacos enrolados e contínuos, a usinagem de compósitos reforçados com fibra de matriz polimérica forma-se cavacos desintegrados e fragmentados por fratura de fibras, falha de matriz e descolamento entre as fibras e a matriz (WAN *et al.*, 2019).

Compósitos de matriz polimérica termoplástica são geralmente fabricados próximos das dimensões finais e, posteriormente, são utilizados processos de usinagem. Peças de CFRP são montadas frequentemente com uso de rebites e parafusos, o que exige a obtenção de furos nas peças para a fixação desses elementos. Isto torna o processo de furação um dos mais usados processos de usinagem (GENG *et al.*, 2019; ZHANG; LU, 2018).

O problema mais comum durante na usinagem de CFRP é a delaminação (AMIN *et al.*, 2018; HAEGGER *et al.*, 2019; KUBHER *et al.*, 2021; VINAYAGAMOORTHY, 2018; ZADAFIYA *et al.*, 2021). A delaminação é a fissura interlaminar entre o reforço de fibra e a matriz polimérica, resultando em perda de rigidez e resistência, e está relacionada com as forças de corte dos processos de usinagem. Na furação, quando a força de corte ultrapassa um valor crítico, ocorre o arrancamento das fibras na entrada da ferramenta de corte e a flexão da última camada na saída do furo no compósito (WANG; JIA, 2021; ZADAFIYA *et al.*, 2021). Parâmetros de usinagem, geometria da ferramenta e material da ferramenta afetam as forças de corte e são investigados para evitar delaminação (PANCHAGNULA; PALANYANDI, 2018; GEIER *et al.*, 2019; CEPERO- MEJÍAS *et al.*, 2020; GENG *et al.*, 2019). No processo de furação, o problema de delaminação é reduzido por altas velocidades de rotações e baixas taxas de avanço (VINAYAGAMOORTHY, 2018; PANCHAGNULA; PALANYANDI, 2018 e KUBHER *et al.*, 2021).

O objetivo deste trabalho foi investigar o comportamento da potência de usinagem máxima, da vibração e do aparecimento da delaminação durante a furação de um compósito de matriz termoplástica (PA6) reforçado com fibras de carbono, variando-se avanço, velocidade de corte e utilizando-se duas ferramentas distintas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Compósito polimérico reforçado com fibras de carbono (CFRP)

O material usinado é o compósito de matriz termoplástica de poliamida 6, reforçada com fibras de carbono, o CETEX TC910 PA6 T7000SC-12K da Toray. O teor de fibras, que foi medido de acordo com a norma ASTM D3171 - 15 (ASTM, 2015) é de 62,87±0,46 % em massa, sendo a densidade do compósito de 1,73 g/cm³. O compósito foi fabricado pela fabricante, com a laminação de 12 camadas de *semipregs*, moldadas por compressão à quente, sendo o tecido de fibra de carbono do tipo *Twill* 2x2. O módulo de elasticidade do material, medida de acordo com a norma ASTM D 3039/D 3039M - 14 (ASTM, 2014), é de 50,587±4,209 GPa.

Os corpos de prova foram cortados com as dimensões de 250 x 40 x 4,5 mm. Este compósito foi então submetido a furações, conforme pode ser visto na Figura 1 (I), respeitando-se a distância mínima entre furos e borda de dois diâmetros de broca (12 mm) e a distância entre furos de pelo menos um diâmetro (6 mm). Foram utilizadas para a realização dos ensaios, duas brocas com diâmetro de 6 mm e hélice dupla, uma de metal duro revestido de TiAlN, da marca Heinz (código 338100), e a outra de aço rápido recoberta com TiN. Os ângulos de pontas das duas brocas também diferiam, sendo para a broca de metal duro de 120° e para a de aço rápido revestido de 105°. Ambas as brocas utilizadas podem ser vistas na Figura 1 (II).

2.2. Centro de usinagem e captação de dados

Os ensaios de furação foram realizados no Laboratório de Estudos de Usinagem (LEU) do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) na UNESP de Guaratinguetá, em um centro de usinagem da DMG Modelo DMU50ECO Ecoline (Figura 2(a)). Foram captados durante os ensaios de furação as variáveis de vibração e potência de usinagem.

A vibração foi medida com um sensor piezo elétrico da marca VibroControl modelo TV100, em mm/s, afixado na mesa do centro de usinagem. A potência de usinagem foi obtida através de um sensor de efeito Hall da marca LEM

modelo AT 100 B10, posicionado na entrada de energia do equipamento conforme montagem encontrada na Figura 2(b). Os dados de potência de usinagem e de vibração foram captados com auxílio de uma placa de aquisição de dados da National Instruments, modelo BNC-2120 e do software LABVIEW®. A taxa de aquisição foi de 8 kHz por canal, taxa essa compatível com a placa de aquisição utilizada e que possibilita a análise do fenômeno de furação de compósitos, conforme experiências anteriores obtidas pelo grupo de pesquisa. Esses dados foram posteriormente convertidos, tratados e analisados através do software MATLAB® 2022a, onde também se obteve os gráficos do comportamento de potência de usinagem e vibração durante o processo de furação, denominado comportamento dinâmico do ensaio. A análise do comportamento dinâmico dos ensaios de furação pode ser usada para a construção de sistemas de monitoramento do processo. Entender como sinais de potência e vibração se relacionam com a qualidade dos furos produzidos é chave para desenvolvimento destes sistemas.



Figura 1. I - Corpo de prova de CETEX TC910 T7000SC-12K. II - (a) Broca de Metal Duro revestido de TiAlN; (b) Broca de Aço Rápido revestida de TiN.



Figura 2. (a) Centro de Usinagem DMG modelo DMU50ECO ECOLINE do DMT-FEG/UNESP; (b) Montagem para a realização de furação do compósito.

2.3. Parâmetros de ensaio e planejamento experimental

Adotou-se como planejamento experimental o arranjo ortogonal de Taguchi L_{16} , analisando-se três fatores, velocidade de corte (V_c), avanço da ferramenta (f) e 2 ferramentas distintas. Na Tabela 1 podem ser vistos os níveis adotados para os fatores de V_c , avanço da ferramenta e ferramenta.

Tabela 1. Fatores e níveis utilizados na arranjo ortogonal de Taguchi L_{16} .

Fatores	Níveis
Velocidade de corte V_c	[18,85; 37,70; 56,55; 75,40; 94,25; 113,10; 131,95; 150,80] m/min
Avanço da ferramenta f	[0,06; 0,10] mm/rot
Ferramenta	[Metal duro revestido de TiAlN (MD+TiAlN); Aço rápido revestido de TiN (HSS+TiN)]

Estes experimentos são os experimentos exploratórios realizados para se conhecer o processo de usinagem do TC910 da Toray. Desta forma, escolheu-se o arranjo ortogonal de Taguchi L_{16} , que possibilitou a investigação de até 8 velocidade de corte diferentes, ampla variação, sendo investigados valores de V_c desde 18,85 m/min, o que equivale a uma rotação da ferramenta de 1.000 RPM, até $V_c = 150,80$ m/min, rotação de 8.000 RPM que é a máxima para o centro de usinagem utilizado. As velocidades de corte correspondem a rotações da ferramenta, com diâmetro de 6 mm, de 1.000, 2.000, 3.000, 4.000, 5.000, 6.000, 7.000 e 8.000 RPM. Explorou-se também 2 níveis de avanço e 2 ferramentas diferentes. Os valores

de avanço selecionados, 0,06 mm/rot e 0,10 mm/rot, estão dentro dos valores comumente encontrados na literatura. Foram realizadas 2 repetições para cada combinação experimental testada, conforme pode ser visto na Tabela 2. Em um planejamento experimental fatorial completo, as mesmas condições experimentais exigiriam a realização de 64 (8x2x2x2) experimentos. No arranjo ortogonal de Taguchi L₁₆, conseguiu-se reduzir para 32 experimentos, o que justifica a escolha pela metodologia.

Tabela 2. Matriz experimental de acordo com arranjo ortogonal de Taguchi L₁₆.

Combinação Experimental	V _c (m/min)	Avanço (mm/rot)	Ferramenta	Combinação Experimental	V _c (m/min)	Avanço (mm/rot)	Ferramenta
1	18,85	0,06	HSS+TiN	9	94,25	0,06	MD+TiAlN
2	18,85	0,1	MD+TiAlN	10	94,25	0,1	HSS+TiN
3	37,70	0,06	HSS+TiN	11	113,10	0,06	MD+TiAlN
4	37,70	0,1	MD+TiAlN	12	113,10	0,1	HSS+TiN
5	56,55	0,06	HSS+TiN	13	131,95	0,06	MD+TiAlN
6	56,55	0,1	MD+TiAlN	14	131,95	0,1	HSS+TiN
7	75,40	0,06	HSS+TiN	15	150,80	0,06	MD+TiAlN
8	75,40	0,1	MD+TiAlN	16	150,80	0,1	HSS+TiN

Existem desvantagens em relação ao método, como por exemplo não permitir, neste arranjo específico, a análise dos efeitos combinados de 2ª e 3ª ordem, porém os efeitos principais de 1ª ordem são analisados.

2.4. Processamento dos dados

Utilizando-se o software MATLAB® R2022a, criou-se rotinas para a filtragem e tratamento dos dados. O primeiro passo foi transformar os valores dos sinais elétricos emitidos pelos sensores nas variáveis de interesse, no caso, vibração e potência de usinagem. A vibração (*Vib*) durante o processo foi obtida pela equação 1 e a potência (*P*) que estava sendo consumida pelo centro de usinagem foi obtida através da equação 2.

$$Vib = \frac{U_{cc.25}}{8} \quad (1)$$

$$P = U_{cc} \cdot 10.220.0,9 \cdot \sqrt{3} \quad (2)$$

Em seguida separava-se os dados referentes ao efetivo momento de contato da broca com a peça através da análise do gráfico de potência (EIXO Y, medido em Watts) obtido no ensaio, conforme pode ser observado na Figura 3.

Com a seleção do momento em que se tinha o início do contato da broca com a peça, destacada na Figura 3, e com o número de pontos captados correspondentes ao momento do início do contato da broca até o momento da saída da broca da peça, pontos este calculados a partir da espessura padrão das peças usinadas e dos avanços utilizados, separava-se os momentos do ensaio onde havia efetiva remoção de material durante a furação. Identificava-se também neste momento a potência em vazio do ensaio, ou seja, a energia utilizada pelo sistema para movimentar cabeçote, vencer atritos da própria máquina. Esta potência era então descontada dos valores obtidos, resultando-se na potência utilizada apenas para a remoção de material, chamada de potência de usinagem.

Para os dados de potência de usinagem e vibração, realizava-se também a conversão dos dados à média a cada centésimo de segundo, pois os 8000 pontos gerados por segundo de ensaio resultavam em gráficos com muitos pontos, o que não permitia a observação dos fenômenos durante a furação. O gráfico gerado possibilitou a análise da dinâmica do processo de furação do compósito de matriz termoplástica TC910. A comparação entre os gráficos com todos os pontos e com a redução à média a cada centésimo de segundos pode ser vista na Figura 4, onde fica perceptível o impacto de se reduzir os pontos dos ensaios à média a cada centésimo de segundo de furação. Deste tratamento, separou-se os valores máximos obtidos durante a furação do CFRP de potência de usinagem e de vibração.

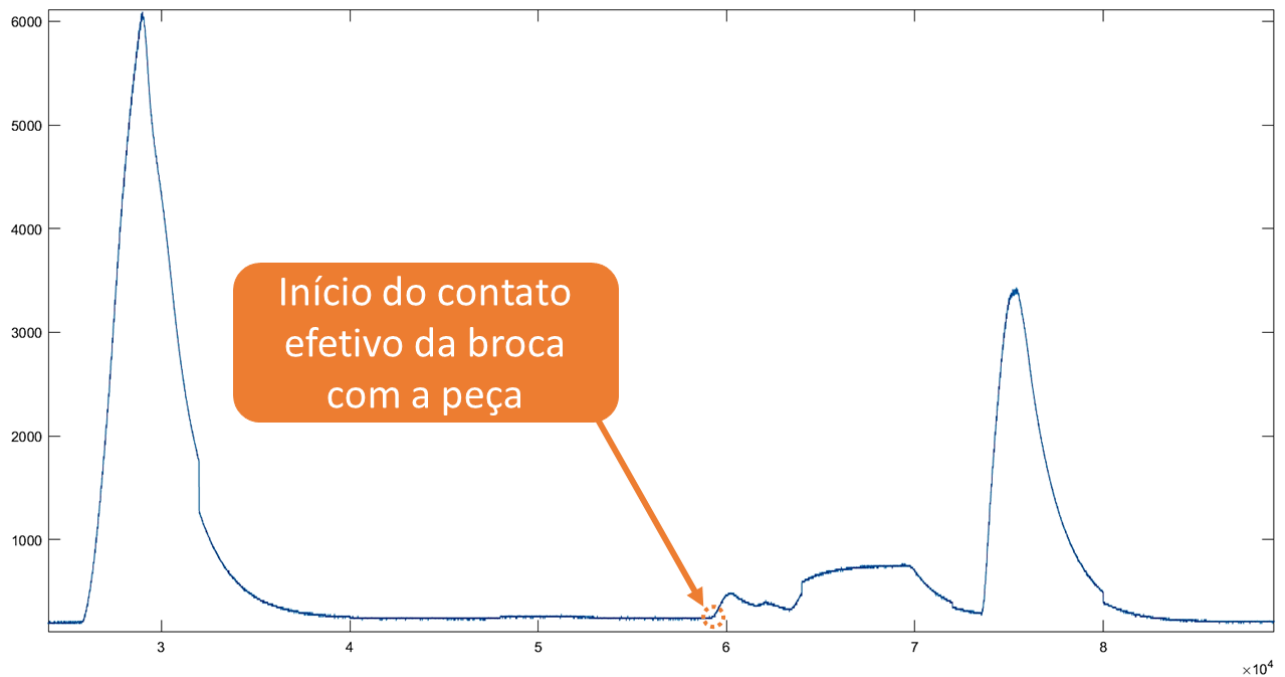


Figura 3. Exemplo de separação do momento de efetivo contato ferramenta-peça.

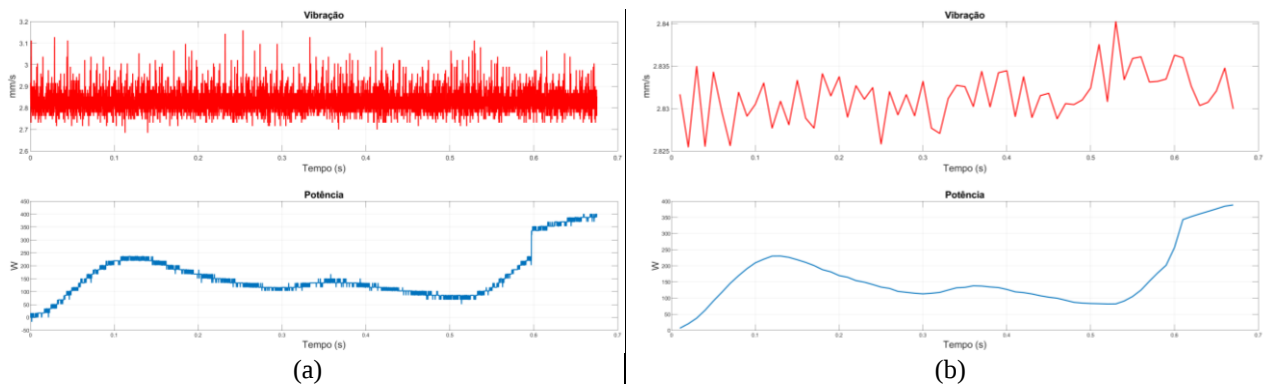


Figura 4. (a) Gráfico do ensaio de furação com captação de 8 kHz. (b) Gráfico do ensaio de furação com redução à média a cada centésimo de segundo.

2.5. Análise de delaminação e análises estatísticas

As medições para o cálculo do fator de delaminação na entrada da ferramenta foram realizadas no sistema de medição óptico Quick Scope QS-LZB série 359 da Mitutoyo do DMT (FEG/UNESP). O fator de delaminação (F_d) pode ser obtido, de acordo com Joshi *et al.* (2018), a partir da equação 3.

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_o} \quad (3)$$

Onde D_{max} é o diâmetro da circunferência concêntrica ao furo que contém a delaminação, em mm, e D_o é o diâmetro nominal do furo de 6 mm.

Utilizou-se a análise de variância (ANOVA) como teste de comparação e obtenção dos efeitos entre as diferentes combinações experimentais, com nível de significância de 95%, e o teste de Tukey, também com nível de confiança de 95%, como teste de comparação de médias entre os níveis de velocidade de corte utilizados. Foram testadas as resposta de

3. RESULTADOS

3.1. Potência máxima de usinagem na furação

Na Figura 5(a) podem ser vistos os gráficos dos efeitos principais dos fatores velocidade de corte, avanço e ferramenta sobre a média das potências máximas de usinagem.

Realizando-se um teste de comparação de Tukey ($\alpha=0,05$), encontrou-se o agrupamento dos níveis para ROTAÇÃO presentes na Figura 5(b). Níveis de V_c que não compartilham pelo menos uma letra de agrupamento possuem médias de potência máxima de usinagem estatisticamente diferentes entre si. Por exemplo, as médias dos níveis 18,85, 37,70 e 56,55 m/min compartilham o agrupamento com letra “A”, ou seja suas médias não diferem entre si. Já comparando-se as médias de potência máxima para as V_c de 37,70 m/min e 150,80 m/min, tem-se que as médias diferem entre si, uma vez que elas não dividem as mesmas letras de agrupamento, respectivamente A e C.

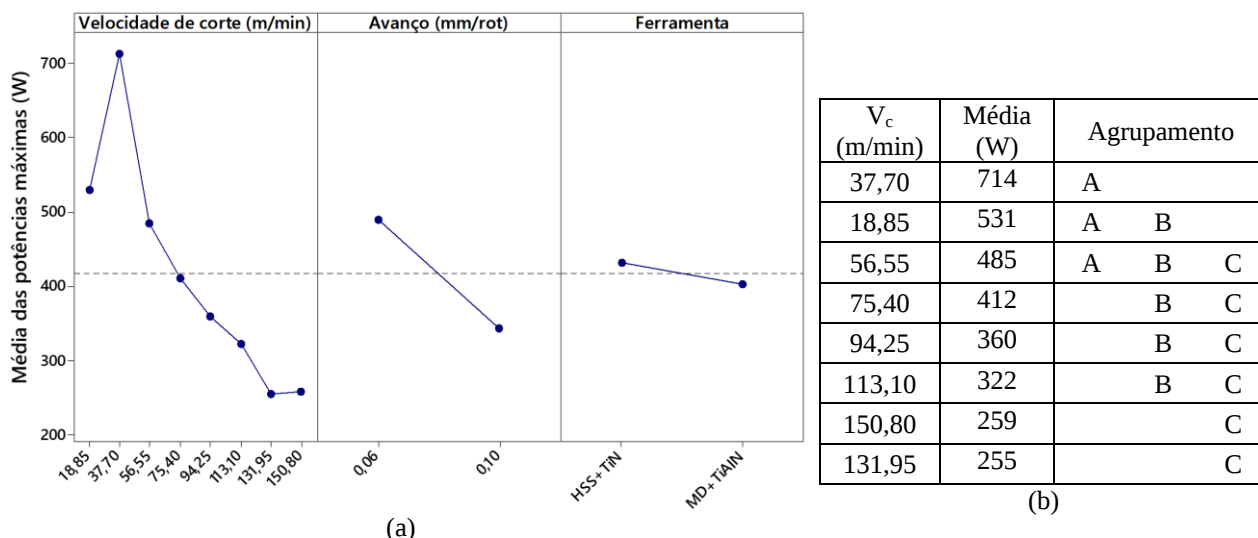


Figura 5. (a) Gráfico de efeitos principais sobre as médias das potências máximas; (b) Teste de Tukey para as médias de potência máxima dos níveis de rotação.

Pela ANOVA, considerando um nível de confiança de 95% ($\alpha=0,05$), os fatores que se mostraram significativos na média de potência máxima foram V_c (Valor-P = 0,027 e Contribuição = 70,49 %) e f (Valor-P = 0,020 e Contribuição = 17,96 %). A mudança de nível do fator ferramenta (Valor-P = 0,562) não apresentou médias que diferiam estatisticamente entre si, ou seja, o uso da broca MD+TiAlN não apresentou médias diferentes de potência máxima quando se utilizou a broca de HSS+TiN.

As menores médias de potência máxima foram obtidas quando se realizou a furação com V_c de 131,95 m/min (254,856 W) e avanço de 0,10 mm/rot (343,808 W). Vale ressaltar que a média dos valores de potência máxima quando a velocidade de corte era de 131,95 m/min, não difere estatisticamente das médias para as velocidades de corte de 56,55 a 150,80 m/min. Qualquer uma das ferramentas pode ser usada, do ponto de vista da potência máxima, uma vez que suas médias não diferem entre si. A linha pontilhada da Figura 5(a) representa a média das médias com valor de 417,300 W.

Os valores de potência de usinagem estão relacionados ao custo energético da remoção de material da peça. Menores valores de potência de usinagem resultam em menores energias necessárias para o corte efetivo do CFRP.

3.2. Vibração máxima na furação

Os efeitos principais dos fatores velocidade de corte, avanço e ferramenta sobre a média dos valores de vibração máxima podem ser vistos na Figura 6(a). Realizou-se o teste de Tukey para as médias dos diferentes níveis de rotação e o agrupamento resultante pode ser visto na Figura 6(b).

A ANOVA para a variável resposta vibração máxima, considerando um nível de significância de 95 % ($\alpha = 0,05$), resultou que nenhum dos três fatores analisados velocidade de corte (Valor-P = 0,058), avanço (Valor-P = 0,730) e ferramenta (Valor-P = 0,786) possuíram efeitos significativos nas médias de vibração máxima durante a furação do TC910.

Entretanto, pelo teste de Tukey, pode-se afirmar que o menor média de vibração máxima encontrada, para velocidade de corte 75,40 m/min (3,1684 mm/s), difere estatisticamente da maior encontrada, no nível de 113,10 m/min (3,2805 mm/s). A média das médias de vibração máxima obtida nos ensaios foi de 3,2052 mm/s, representada pela linha pontilhada no gráfico da Figura 6(a).

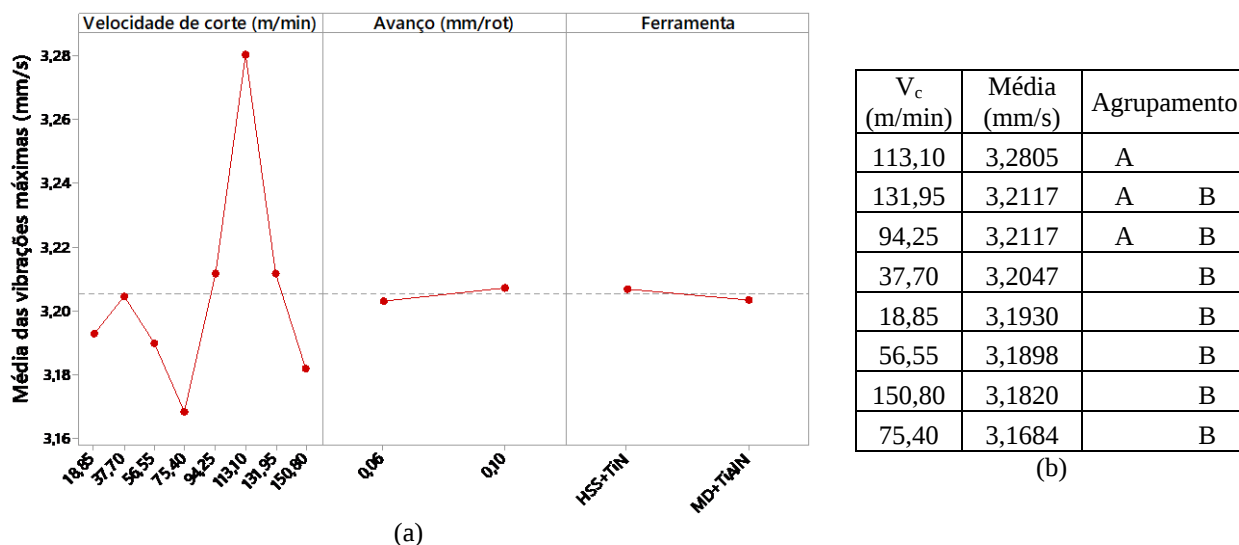


Figura 6. (a) Gráfico dos efeitos principais nas médias de vibração máxima; (b) Teste de Tukey para as médias de vibração máxima dos níveis de rotação.

3.3. Fator de delaminação (F_d)

Na Figura 7(a), pode ser encontrado o gráfico dos efeitos principais dos fatores velocidade de corte, vibração e ferramenta sobre as médias de F_d. Na Figura 7(b), encontra-se o teste de Tukey de comparação de médias do fator de delaminação para os diferentes níveis de rotação utilizados no processo de furação do TC910.

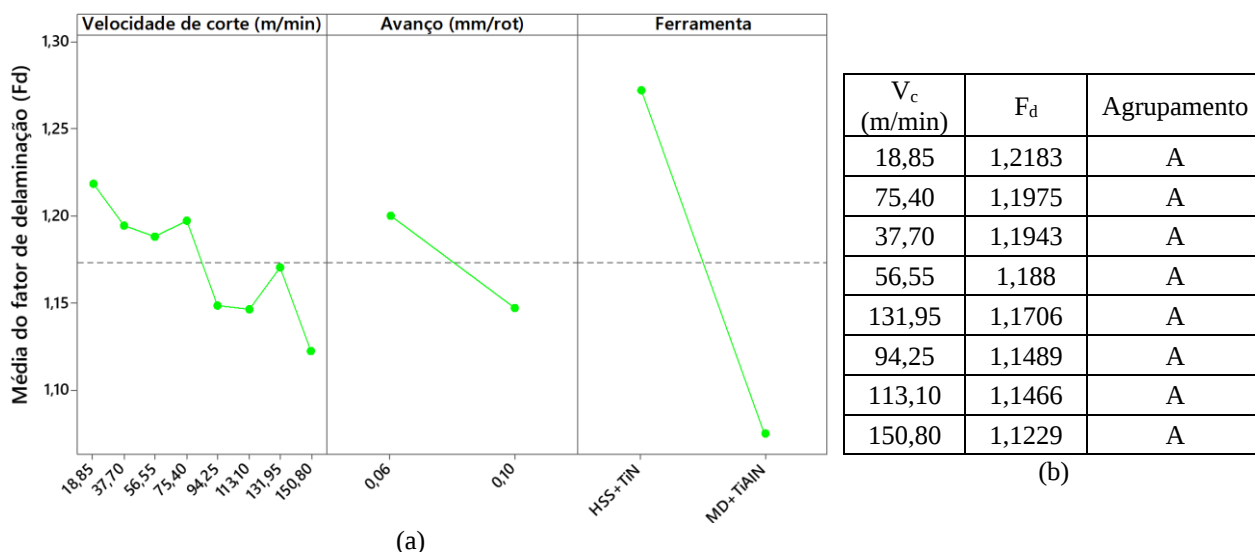


Figura 7. (a) Gráfico de efeitos principais das médias do fator de delaminação; (b) Teste de Tukey para as médias do fator de delaminação para os diferentes níveis de rotação utilizados.

Pela ANOVA com 95 % de nível de confiança, todos os três fatores analisados tiveram influência significativa nos valores médios de fator de delaminação. O destaque fica para a contribuição da ferramenta (Valor-P = 0,000 e Contribuição de 85,53 %) sendo a ferramenta de metal duro revestida de TiAlN e com ângulo de ponta de 120° a que apresentou menores médias de fator de delaminação (F_d = 1,07513). A média das médias de fator de delaminação obtidos nos ensaios, e representado pela linha tracejada na Figura 7(a), foi de F_d = 1,1734. Quanto mais próximo o fator de delaminação ficar do valor um, menores foram as ocorrências de delaminação nas bordas dos furos do compósito. As contribuições de velocidade de corte (Valor-P = 0,001) e avanço (Valor-P = 0,000) tiveram contribuições nos efeitos sobre as médias do fator de delaminação de 7,90 % e 6,18 %, respectivamente.

Apesar da ANOVA mostrar que houve diferença significativa nas médias de F_d com a alteração da velocidade de corte, a realização do teste de Tukey não detectou diferenças significativas entre as médias de F_d. Uma explicação para o fato se deve a alta variância encontrada nos valores de F_d entre as repetições para determinado nível de rotação. Isso pode ser visto no diagrama de caixas (*boxplot*) da Figura 8. Este comportamento de variabilidade pode ser explicado pelo fato

de que, para o cálculo da média para cada velocidade de corte, são levados em conta as repetições com o uso das diferentes brocas estudadas. Por exemplo, na média de F_d para a velocidade de corte de 18,85 m/min, foram utilizados os valores das combinações experimentais de $V_c = 18,85$ m/min, $f = 0,06$ mm/rot e ferramenta de HSS+TiN e $V_c = 18,85$ m/min, $f = 0,10$ mm/rot e ferramenta de MD+TiAlN. É importante lembrar que o fator ferramenta teve uma contribuição alta (85,53 %) sobre os valores de F_d quando comparada a contribuição dos fatores velocidade de corte (7,90 %) e avanço (6,18 %).

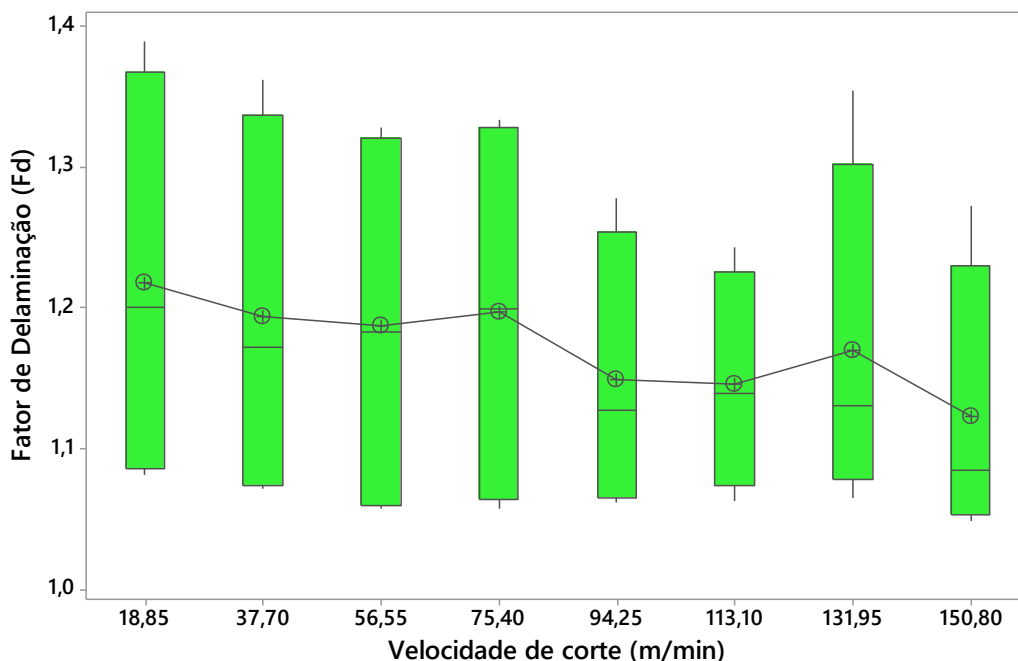


Figura 8. Diagrama de caixa para os valores do fator de delaminação para diferentes rotações utilizadas.

No diagrama de caixas da Figura 8, a linha da parte de cima do formato de vela de cada nível de rotação analisado, o “pavio da vela”, corresponde aos valores do primeiro quartil. Do fim da linha até uma linha horizontal no meio da caixa, no “corpo da vela”, tem-se a representação dos valores presentes no segundo quartil. Desta linha até o fim a parte de baixo da caixa tem-se a representação dos valores correspondentes ao terceiro quartil, e a linha vertical abaixo de cada caixa representa os valores de presentes no quarto quartil dos valores de F_d . A média está representada pela cruz circunscrita na parte verde da caixa, no “corpo da vela”.

Na Figura 9 é possível verificar os resultados extremos de F_d encontrados nos ensaios, maior delaminação e menor delaminação. A delaminação é a região escura em torno das bordas do furo, furo este que se encontra com maior brilho no centro de cada imagem. As medidas dos diâmetros do furo são dadas em mm. Percebe-se, em ambas as situações, a ocorrência de rompimento de fibras. Foi perceptível, numa observação visual macroscópica dos furos, que os danos ocasionados pelas broca de HSS+TiN foram maiores dos que nos furos realizados com a broca MD+TiAlN.

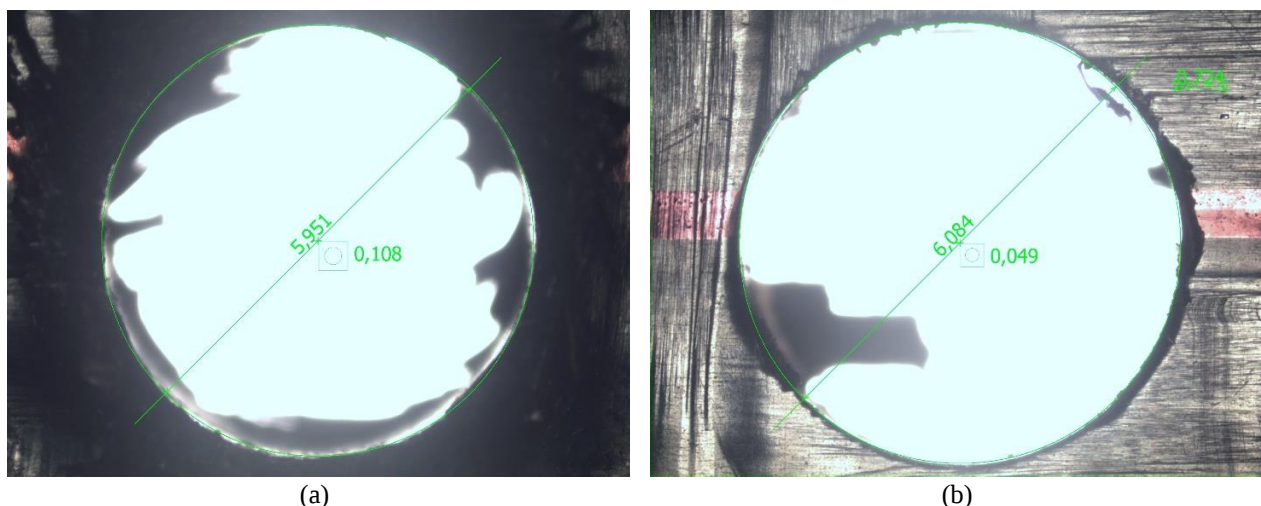


Figura 9. (a) Maior delaminação na furação com $V_c = 18,85$ m/min, $f = 0,06$ mm/rot e HSS+TiN ($F_d = 1,38997$); (b) Menor delaminação na furação com $V_c = 150,80$ m/min, $f = 0,06$ mm/rot e MD+TiAlN ($F_d = 1,04883$).

A combinação de parâmetros que minimizaria a ocorrência de delaminação, com valores de fator de delaminação mais baixos, é a velocidade de corte de 150,80 m/min, avanço de 0,10 mm/rot e ferramenta com ângulo de ponta de 120° de metal duro revestido de TiAlN. Os maiores valores de velocidade de corte e uso de maiores ângulos de ponta para minimizar o fenômeno de delaminação estão de acordo com os resultados encontrados na literatura (VINAYAGAMOORTHY, 2018; PANCHAGNULA; PALANIYANDI, 2018 e KUBHER et al., 2021).

4. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo o estudo do processo de furação do TC910, compósito polimérico de matriz termorrígida (PA6) reforçado com tecido de fibra de carbono. Para tanto explorou-se três fatores, velocidade de corte e avanço da ferramenta e diferentes ferramentas de corte. Analisou-se para tanto as variáveis de saída potência máxima de usinagem, vibração máxima durante a furação e o fator de delaminação dos furos usinados.

Os parâmetros que apresentaram menor potência máxima de usinagem e que apresentaram diferença estatisticamente significativa foram velocidade de corte de 131,95 m/min e avanço da ferramenta de $f = 0,10$ mm/rot. Dentre os dois fatores, a velocidade de corte teve uma contribuição sobre os valores de potência máxima de usinagem maior (contribuição = 70,49 %) do que o avanço (contribuição = 17,96 %).

Os menores valores de vibração encontrados foram para os valores de velocidade de corte de 75,40 m/min, porém que não difere, de acordo com a ANOVA e o teste de Tukey, dos outros valores de velocidade de corte, com exceção de $V_c = 113,10$ m/min.

O principal e mais crítico problema na furação de CFRP é a ocorrência de delaminação, que afeta em muito a resistência e vida à fadiga de componentes e peças de compósito. Nos estudos e análises realizados, recomenda-se, para a minimização do aparecimento de delaminação nas bordas de entrada dos furos do compósito TC910, a utilização de brocas de metal duro revestidas de TiAlN e com ângulo de ponta de 120°, o uso de velocidade de corte de 150,80 m/min e avanço de 0,10 mm/rot.

Este trabalho foi realizado como um dos estudos iniciais de furação de compósito termorrígido para uso na indústria automotiva de alta cadência de produção. Os estudos futuros contemplam a investigação da influência de diferentes ângulos de ponta para um mesmo material de broca, estudos de furação com brocas diamantadas e exploração da mais variáveis respostas, como valor do diâmetro real do furo, circularidade, força de avanço e estudos sobre o fenômeno de delaminação em compósitos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa ‘Rota 2030’ intitulado “Desenvolvimento de Competências para Projeto e Fabricação de Ferramental para Peças em Compósitos” nº 27194.03.03/2020.01-00 pelo apoio financeiro; ao LEL/IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo); a FIPT (Fundação de Apoio do IPT), a FUNDEP (Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa), ao CNPq (304876/2020-8e 306576/2020-1) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

6. REFERÊNCIAS

- AHMAD, N.; KHAN, S. A.; RAZA, S. F. Influence of hole diameter, workpiece thickness, and tool surface condition on machinability of CFRP composites in orbital drilling: a case of workpiece rotation. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 103, n. 5–8, p. 2007–2015, 2019.
- AMIN, M.; YUAN, S.; ISRAR, A.; ZHEN, L.; QI, W. Development of cutting force prediction model for vibration-assisted slot milling of carbon fiber reinforced polymers. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 94, n. 9–12, p. 3863–3874, 2018.
- ASTM. **D3039/D3039M - 14 - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. [S. l.: s. n.], 2014.
- ASTM. **D3171 - 15 - Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials**. [S. l.: s. n.], 2015.
- AVEEN, K. P.; LONDE, N. V.; AMIN, G. G.; SALIM SHAIKH, I. A review on the effects of input parameters & filler composition on delamination during machining of FRP composites. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 46, p. 2607–2611, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.264>.
- CAGGIANO, A. Machining of fibre reinforced plastic composite materials. **Materials**, [s. l.], v. 11, n. 3, 2018.
- CEPERO-MEJÍAS, F.; CURIEL-SOSA, J. L.; BLÁZQUEZ, A.; YU, T. T.; KERRIGAN, K.; PHADNIS, V. A. Review of recent developments and induced damage assessment in the modelling of the machining of long fibre reinforced polymer composites. **Composite Structures**, [s. l.], v. 240, n. February, 2020.
- GAO, T.; LI, C.; WANG, Y.; LIU, X.; AN, Q.; LI, H. N.; ZHANG, Y.; CAO, H.; LIU, B.; WANG, D.; SAID, Z.;

- DEBNATH, S.; JAMIL, M.; ALI, H. M.; SHARMA, S. Carbon fiber reinforced polymer in drilling: From damage mechanisms to suppression. **Composite Structures**, [s. l.], v. 286, n. May 2021, p. 115232, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115232>.
- GENG, D.; LIU, Y.; SHAO, Z.; LU, Z.; CAI, J.; LI, X.; JIANG, X.; ZHANG, D. Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review. **Composite Structures**, [s. l.], v. 216, n. February, p. 168–186, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.099>.
- HAEGER, A.; GRUDENIK, M.; HOFFMANN, M. J.; KNOBLAUCH, V. Effect of drilling-induced damage on the open hole flexural fatigue of carbon/epoxy composites. **Composite Structures**, [s. l.], v. 215, n. September 2018, p. 238–248, 2019.
- JOSHI, S.; RAWAT, K.; A.S.S, B. A novel approach to predict the delamination factor for dry and cryogenic drilling of CFRP. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 262, n. July, p. 521–531, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.026>.
- KHANNA, N.; AGRAWAL, C.; PIMENOV, D. Y.; SINGLA, A. K.; MACHADO, A. R.; DA SILVA, L. R. R.; GUPTA, M. K.; SARIKAYA, M.; KROLCHYK, G. M. Review on design and development of cryogenic machining setups for heat resistant alloys and composites. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 68, n. PA, p. 398–422, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.053>.
- KONDO, M. Y.; MONTAGNA, L. S.; MORGADO, G. F. de M.; CASTILHO, A. L. G. de; BATISTA, L. A. P. dos S.; BOTELHO, E. C.; COSTA, M. L.; PASSADOR, F. R.; REZENDE, M. C.; RIBEIRO, M. V. Recent advances in the use of Polyamide-based materials for the automotive industry. **Polímeros**, [s. l.], v. 32, n. 2, 2022.
- KUBHER, S.; GURURAJA, S.; ZITOUNE, R. In-situ cutting temperature and machining force measurements during conventional drilling of carbon fiber polymer composite laminates. **Journal of Composite Materials**, [s. l.], v. 55, n. 20, p. 2807–2822, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0021998321998070>.
- MCKEEN, L. W. Chapter 7 - Polyamides (Nylons). In: THE EFFECT OF UV LIGHT AND WEATHER ON PLASTICS AND ELASTOMERS. [S. l.]: Elsevier, 2019. p. 185–222. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128164570000071>.
- MONTAGNA, L. S.; KONDO, M. Y.; CALLISAYA, E. S.; MELLO, C.; DE SOUZA, B. R.; LEMES, A. P.; BOTELHO, E. C.; COSTA, M. L.; DE SAMPAIO ALVES, M. C.; RIBEIRO, M. V.; REZENDE, M. C. A review on research, application, processing, and recycling of PPS based materials. **Polimeros**, [s. l.], v. 32, n. 1, 2022.
- PANCHAGNULA, K. K.; PALANIYANDI, K. Drilling on fiber reinforced polymer/nanopolymer composite laminates: A review. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 180–189, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.06.003>.
- TROUGHTON, M. J. Chapter 25 - Polyamides. In: TROUGHTON, Michael J. (org.). **Handbook of Plastics Joining: A practical guide**. [S. l.]: Elsevier, 2009. p. 241–250. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780815515814500263>.
- VINAYAGAMOORTHY, R. A review on the machining of fiber-reinforced polymeric laminates. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 49–59, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0731684417731530>.
- WAN, M.; LI, S. E.; YUAN, H.; ZHANG, W. H. Cutting force modelling in machining of fiber-reinforced polymer matrix composites (PMCs): A review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 117, n. October 2018, p. 34–55, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.11.003>.
- WANG, X.; WANG, F.; GU, T.; JIA, Z.; SHI, Y. Computational simulation of the damage response for machining long fibre reinforced plastic (LFRP) composite parts: A review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 143, n. October 2020, p. 106296, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106296>.
- ZADAFIYA, K.; BANDHU, D.; KUMARI, S.; CHATTERJEE, S.; ABHISHEK, K. Recent trends in drilling of carbon fiber reinforced polymers (CFRPs): A state-of-the-art review. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 69, n. July, p. 47–68, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.07.029>.
- ZHANG, C.; LU, M. A novel variable-dimensional vibration-assisted actuator for drilling CFRP. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 99, n. 9–12, p. 3049–3063, 2018.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

ANALYSIS OF THE DRILLING PROCESS OF A CARBON FIBER REINFORCED THERMOPLASTIC POLYMER USED IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

Marcel Yuzo Kondo

Emanuele Schneider Callisaya

São Paulo State University (UNESP) – Department of Materials and Technology (DMT) – School of engineering and science of Guaratinguetá, Ariberto Pereira da Cunha Ave., 333 - Portal das Colinas - Guaratinguetá/SP
marcel.kondo@unesp.br; schneider.callisaya@unesp.br

Michelle Leali Costa

São Paulo State University (UNESP) – Department of Materials and Technology (DMT) – School of engineering and science of Guaratinguetá, Ariberto Pereira da Cunha Ave., 333 - Portal das Colinas - Guaratinguetá/SP
Institute for Technological Research (IPT) – Lightweight Structures Laboratory (LEL) – São José dos Campos, Dr. Altino Bondensan Road, 500 - Eugênio de Melo District, São José dos Campos/SP
mlcosta@ipt.br

Edson Cocchieri Botelho

Manoel Cléber de Sampaio Alves

Marcos Valério Ribeiro

São Paulo State University (UNESP) – Department of Materials and Technology (DMT) – School of engineering and science of Guaratinguetá, Ariberto Pereira da Cunha Ave., 333 - Portal das Colinas - Guaratinguetá/SP
edson.botelho@unesp.br; manoel.aves@unesp.br; marcos.valerio@unesp.br

Abstract. The use of composite materials in the aeronautical industry is well known, where they are used in structural parts, reducing fuel consumption by up to 20% due to the reduction of the total weight of the aircraft with the fulfillment of the requirements and mechanical efforts. Recently, in the search for lighter and more efficient vehicles, the automotive industry seeks to implement and use composite materials in its new projects, with the difference that automotive parts need to be produced at a higher speed than parts for the aeronautical industry due to the production characteristic in high cadence. Fiber-reinforced polymer matrix composite parts are produced close to final dimensions, requiring the use of machining processes to achieve the dimensional design requirements. Many of these parts are assembled by riveting or bolting, requiring the use of drills and/or milling cutters in the drilling process. One of the main defects that occur in this process is delamination in the entry and exit region of the cutting tools on the piece, which impairs the mechanical resistance of the parts. The objective of this work was to study the drilling process of a carbon fiber reinforced thermoplastic polymer (PA6), analyzing the influence of tool rotation, feed rate and two different tool materials on the cutting power, process vibration, and delamination process. An orthogonal array of Taguchi L_{16} was used as experimental design. The contribution in the phenomenon of delamination (Delamination Factor) of the cutting tool material was the highest (85.57%), while rotation and advance had contributions of 7.98% and 5.87%, respectively. The lowest delamination parameters were obtained with a rotation of 8000 RPM and an advance of 0.10 mm/rotation, using a carbide tool with TiAlN coating. The best machining conditions were also obtained in relation to the analyzed output parameters, maximum power and vibration.

Keywords: CFRP; Taguchi; Consumed Power; Vibration; Delamination

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.