

INVESTIGAÇÃO DO PROCESSO DE FRESAMENTO DE CFRP_s TERMOPLÁSTICOS UTILIZANDO O MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DE TAGUCHI

Emanuele Schneider Callisaya
Marcel Yuzo Kondo
Marcos Valerio Ribeiro
Michelle Leali Costa
Edson Cocchieri Botelho
Manoel Cleber de Sampaio Alves

Faculdade de Engenharia e Ciências - Câmpus de Guaratinguetá, Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, 12.516-410, Guaratinguetá-SP.
schneider.callisaya@unesp.br; marcel.kondo@unesp.br

Resumo: Atualmente a usinagem de componentes compósitos enfrenta diversos desafios no ambiente industrial. Dentre as principais dificuldades de alta ocorrência encontram-se os danos que podem surgir no material durante o processo de usinagem como as delaminações além de desgaste acentuado de ferramentas de corte, comprometendo a vida em fadiga, especialmente importante para componentes estruturais. Neste estudo o processo de usinagem por fresamento do compósito de matriz termoplástica Cetex TC 910 PA6 foi analisado com aplicação de duas geometrias de ferramentas de metal duro diamantadas (com hélice neutra e hélice de 8° à esquerda). Durante os ensaios de fresamento foi realizada a variação dos parâmetros de corte em diferentes níveis (avanço por dente, rotação e geometria da ferramenta) segundo planejamento experimental Taguchi L_8 . Após ensaios foi realizada a análise estatística de variância entre as variáveis de entrada do processo e a vibração e potência durante a usinagem sendo a otimização através da análise de médias e sinal-ruído com o objetivo de determinar a influência dos fatores na vibração do processo e identificação da melhor condição de usinagem assim como a geometria de ferramenta mais adequada segundo a metodologia de otimização voltada a qualidade de Taguchi com ênfase na avaliação da variabilidade do processo. Dos resultados, após a usinagem foi observado aumento progressivo de picos vibracionais com o aumento do avanço por dente aplicado, assim como aumento da amplitude com a rotação. A análise estatística aplicada indicou que a redução da variabilidade do processo foi favorecida para aplicação da ferramenta de hélice neutra com menores rotações de 4000 rpm.

Palavras-chave: Potência; Vibração; CFRP; Fibra de Carbono; Fresamento.

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é uma das técnicas mais utilizadas para a fabricação de componentes, devido à grande variedade de possibilidades de materiais processados, formas e características das peças, e por aliar precisão dimensional ao bom acabamento superficial (SHOKRANI et al., 2012). Entretanto, sendo o compósito um material formado por constituintes muito distintos entre si (matriz e fibras), por vezes sua usinagem se torna bastante complexa, dificultando a obtenção de superfícies de boa qualidade e de tolerâncias dimensionais e geométricas precisas (RAMEZANI-DANA et al., 2021). Atualmente, é praticamente impossível que um componente estrutural automotivo seja fabricado sem passar por algum processo de usinagem, seja para uma furação ou para a obtenção de um acabamento superficial exigido no projeto mecânico.

Para atender a demanda de propriedades exigidas em componentes mecânicos, os materiais compósitos apresentam vantagens que aliam as propriedades de resistência à possibilidade de redução de peso de componentes o que aumenta sua aplicabilidade principalmente na indústria automobilística e aeronáutica (MONTAGNA et al., 2022). Os compósitos poliméricos reforçados com fibra de carbono chamados CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) são especificamente desenvolvidos com o intuito de obter materiais que possuam as propriedades para atender a essa demanda industrial (HEGDE et al., 2019). Os CFRP vêm sendo aplicados tradicionalmente em sua grande maioria, na indústria aeronáutica devido as suas características como baixa densidade, resistência a corrosão e alta força específica (HEGDE et al., 2019) diminuindo o peso das estruturas da aeronave, aumentando a eficiência dos motores e reduzindo as emissões de carbono (KARATAŞ et al., 2018).

No entanto, sua aplicação em outras áreas como na indústria automotiva, em peças para automóveis é dificultada, pois esses componentes possuem diversas dificuldades durante o processo de usinagem, além de apresentar um custo elevado de manufatura, devido ao valor do material e eventuais perdas que o processamento possa gerar (KONDO et al., 2022). Embora os componentes de CFRP sejam fabricados com dimensões muito próximas das requeridas, o processamento, em

especial a usinagem é essencial para se obter a geometria, tolerância e qualidade superficial necessária (KUMAR et al., 2020). O custo desse processamento, corresponde de 50 a 60% do preço final (MAZUR, 2010) o que incrementa ainda mais o custo do produto e salienta a importância da usinagem desse material.

Em geral, os métodos convencionais de usinagem são aplicados para usinar materiais compósitos de polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP) e polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP) (KARATAŞ et al., 2018). Entre outros processos, os processos de furação, fresamento e retificação representam uma parte significativa da usinagem desses materiais na indústria automotiva (CHANG et al., 2021).

A usinagem de CFRP por métodos convencionais como o fresamento é uma alternativa que garante a oportunidade de redução de custos durante o processamento, sendo por este motivo a mais adequada e de alta aplicabilidade. No fresamento a ferramenta possui uma ou mais arestas de corte, e o movimento de corte é realizado pela ferramenta. A característica particular do fresamento é que a direção do movimento de avanço é perpendicular ao eixo-árvore principal (eixo de rotação). No entanto, a manufatura por fresamento é dificultada pelos métodos e interações desse processo e devido as estruturas heterogêneas e anisotrópicas dos materiais compósitos (HEGDE et al., 2019), resultando frequentemente em falhas como, por exemplo, retirada da fibra e a delaminação, rachaduras matriciais, redução da vida da ferramenta e produção de poeira prejudicial à saúde (KARATAŞ et al., 2018).

Para usinagem convencional por fresamento de CFRP ser executada, uma série de considerações devem ser observadas para se obter uma melhor qualidade superficial e redução de falhas. Deve-se utilizar uma ferramenta correta, pois, os materiais compósitos apresentam na região do reforço alta abrasividade e dureza em relação à matriz (KARATAŞ et al., 2018) – em torno de 100 HV (GHANI e MAHMUD, 2018) para a fibra de carbono – que podem limitar o desempenho na aplicação das ferramentas de corte. É necessário encontrar os parâmetros de corte adequados, o que levará a uma diminuição significativa das falhas, permitindo que o processo tenha um bom desempenho, evitando ao máximo as perdas tanto de material, quanto da ferramenta além de diminuir o consumo de energia (CALLISAYA et al., 2017). Neste cenário, o estudo da usinagem deste material se faz de extrema relevância contribuindo para a diminuição dos custos de produção de uma peça, tornando-a mais competitiva e aplicável em outras áreas como a indústria automotiva.

Em se tratando de CFRPs com matriz termoplástica, mais especificamente em relação à poliamida e os danos gerados pela absorção de umidade pela matriz, um dos fatores que influenciam na absorção de água por um compósito é a polaridade da matriz, onde quanto maior a polaridade da matriz, maior a absorção de água do material. Além disso, a configuração espacial da molécula de resina utilizada como matriz polimérica também influencia nesse processo, pois, a configuração geométrica espacial podem resultar em uma estrutura mais aberta, permitindo que a água se aloje nos interstícios da estrutura da molécula (CUNHA, 2006). Outro aspecto que impacta diretamente o processamento de compósitos termoplásticos são as temperaturas de processamento e trabalho aos quais esses materiais são submetidos.

O crescimento da delaminação ocorre devido à alguns parâmetros de usinagem como por exemplo, baixa velocidade e vibração e pode influenciar nas propriedades mecânicas da estrutura do material e conseqüentemente, influenciar em seu comportamento mecânico. Como os materiais compósitos possuem uma grande gama de aplicações na engenharia, muitos estudos podem ser encontrados com o objetivo de investigar e reduzir o crescimento da delaminação (ISMAIL et al., 2018).

A redução da variabilidade do processo de usinagem contribui para a redução de falhas que podem ocorrer durante o processo além de reduzir interferências de erros no material submetido ao corte, facilitando a compressão.

A escolha correta dos parâmetros de corte aplicados é essencial para melhoria na qualidade do componente usinado, esses parâmetros representam valores de deslocamento da peça e devem ser adequados ao material a ser usinado e ao material da ferramenta. Os parâmetros de corte que analisados neste estudo são: o avanço por dente (f_z), rotação e geometria de ferramentas empregadas.

Neste estudo é realizada a avaliação e análise dos parâmetros de corte e sua influência no fresamento tangencial de materiais compósitos termoplásticos reforçados com fibra de carbono através da análise de variabilidade do processo para definição das melhores condições de corte de maneira a favorecer a robustez do processo, minimização de interferência do erro experimental e garantia da estabilidade do processo.

2. METODOLOGIA

Para o fresamento foram realizados ensaios no Centro de usinagem CNC modelo DMU50ECO marca DMG Ecoline com posicionamento fixo do sensor para captação do sinal de vibração. A vibração e a potência máxima de usinagem do processo foram mensuradas durante ensaios através do desenvolvimento de um programa supervisor do software Labview da National Instruments®. Para a vibração foi utilizada a aplicação do sensor piezoelétrico da marca Vibro Control modelo TV-100, o sensor foi posicionado na mesa do centro de usinagem para a avaliação da vibração do sistema durante os ensaios. Para captação da potência de usinagem foi utilizado o sensor de corrente LEM AT 100 B10 posicionado na parte posterior do motor da máquina. Para ambos os sensores a taxa de aquisição foi de 8000 pontos por segundo.

Duas geometrias de ferramentas de corte com o substrato de metal duro e recobrimento diamantado foram aplicadas com as seguintes especificações: Fresa Solid Carbide End Mill Fiber-Cut, 2745F, com Ø6 mm e hélice esquerda a 8° (Fig. 1-a) e Fresa Solid Carbide End Mill Fiber-Cut, código 2739F, com Ø6 mm e hélice neutra (Fig. 1-b), ambas da

empresa Emuge Franken. As geometrias testadas foram selecionadas segundo literatura como mais indicadas para aplicações de desbaste e acabamento em CFRP para compósitos com Vfibras > 30%. O recobrimento de alto desempenho Diamond/ZR foi selecionado por proporcionar máxima resistência ao desgaste e vida da ferramenta.

O processo de fresamento foi realizado lateralmente nos corpos de prova do compósito de matriz termoplástica Cetex® Toray TC910 PA6 com dimensões 250x40x5mm (Fig. 1-c) caracterizando fresamento assimétrico tangencial (lateral) discordante.

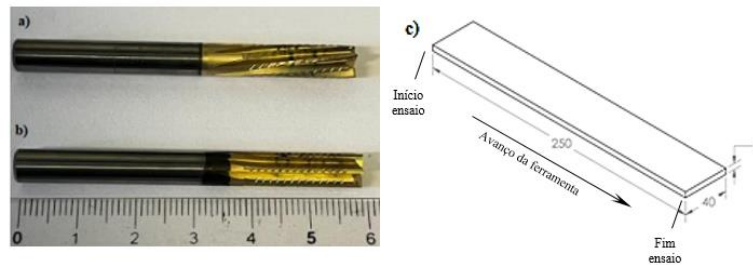


Figura 1. Ferramentas de corte ensaios de fresamento. a) Fresa hélice à esquerda (HE); b) Fresa hélice neutra (HN); c) Corpo de prova compósito e detalhamento do fresamento (Autoria Própria)

Em se tratando da metodologia de ensaios de usinagem, objetivou-se a redução do número de experimentos para os ensaios de fresamento e definição de um planejamento segundo a metodologia Taguchi com arranjo ortogonal L_8 .

Para análise do processo de usinagem foram considerados três fatores de variação do processo, com parâmetros de corte de: avanço por dente f_z (3 níveis: 0,025; 0,05; 0,075 e 0,10 mm/dente) e rotação (2 níveis: 4000 e 8000 rpm) e geometria da ferramenta aplicada (2 níveis: Hélice Neutra HN e Hélice à esquerda HE).

Para cada fator considerado foram analisadas variações em três e dois níveis, a depender do fator analisado.

Foi aplicada a metodologia Taguchi para planejamento robusto de experimentos para avaliação dos dados em foco à qualidade. A metodologia Taguchi é uma metodologia de otimização de processos e vêm sendo muito usado em projetos de engenharia e possui como objetivo a melhor qualidade do produto.

O método Taguchi determina os melhores parâmetros de projetos de forma a determinar os melhores níveis de uma determinada característica do produto com pouca variação. É uma abordagem fácil de ser aplicada e por isso, tornou-se muito utilizada em pesquisas na área da engenharia e pode ser utilizada principalmente em três situações: Maior melhor, menor melhor e atingir um valor objetivo com a menor variação (ANTONY et al., 2020).

A metodologia Taguchi oferece uma das melhores formas de eliminar variações durante o processo de usinagem pois com este método é possível identificar os fatores mais importantes além de economizar tempo computacional na computação e diminuir o número de experimentos (KARNA et al., 2012).

Para verificação de influência de dados foi aplicada a análise de variância aos resultados da razão sinal-ruído do processo. A análise de variância para Taguchi lista um valor de F para cada fator, sendo o valor de F a estatística de teste usado para determinar se o fator está associado com a resposta. O valor de F também é utilizado para cálculo do valor de P, que pode ser usado para a tomada de uma decisão sobre a significância estatística dos fatores. Sendo o valor de P relativa à probabilidade que mede a evidência contra a hipótese nula. As probabilidades inferiores fornecem evidências mais fortes contra a hipótese nula. Um valor de F grande o bastante indica que o fator ou modelo é significativo.

Para a determinação da associação estatisticamente significativa entre a resposta e cada fator considerado no modelo foi realizada a comparação do valor de P para o fator com o seu nível de significância padrão de 0,05 ($\alpha=5\%$).

A análise de variabilidade aplicada à metodologia Taguchi permitiu a investigação das melhores condições de usinagem do material. Correlacionando a análise estatística à metodologia Taguchi é possível encontrar as definições e orientações de interpretação para cada estatística, utilizando como base a tabela resposta fornecida após a análise de variância. A tabela de resposta é utilizada para realizar a seleção do melhor nível de variação dentro de cada fator.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a investigação do processo de fresamento foi realizada a análise da variabilidade do processo segundo metodologia Taguchi através do estudo da variação da razão sinal-ruído (razão S/R).

A razão S/R fornece uma medida da característica da solidez do processo de fresamento que possibilita a identificação das definições dos fatores de controle (parâmetros de corte) que minimizem o efeito de ruído sobre a resposta, ou seja que reduzam a variabilidade. O cálculo da razão sinal-ruído do processo foi realizada para cada combinação de níveis dos fatores aplicados, sendo desejável maximizar a razão S/R ou seja reduzir a variabilidade considerando sempre o interesse estatístico “menor é melhor”.

Para a potência máxima de usinagem durante o processo, foi possível observar que a análise de variância para o sinal ruído S/R (Tabela 1) evidenciou a influência dos parâmetros de corte analisados e a mudança de geometria da ferramenta

com impacto significativo na potência de usinagem com influência a um nível de confiança de 95%, tendo os parâmetros de avanço, rotação e geometria da ferramenta apresentado valores de P de (0,000; 0,000; 0,001). O valor médio de potência obtido para o compósito foi de 98,5 W. Dentre os parâmetros aplicados o avanço por dente e rotação apresentaram expressivo impacto na variabilidade do processo. Com destaque para a rotação aplicada, com valor de F de 4012,0 representando alta relevância da variação da rotação nos resultados de potência de usinagem.

Tabela 1. Análise de variância ANOVA para a razão S/R da potência de usinagem durante o processo (Autoria Própria)

Fator	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	Valor de F	Valor de P
Avanço f_z	3	90,604	90,6040	30,2013	2105,40	0,000
Rotação	1	57,551	57,5510	57,5510	4012,00	0,000
Ferramenta	1	21,389	21,3887	21,3887	1491,05	0,001
Erro	2	0,029	0,0287	0,0143		
Total	7	169,572				

No gráfico de efeitos principais da razão S/R (Fig. 2) foi possível constatar que o menor nível dos parâmetros aplicados favoreceu a redução das variáveis de saída do processo tanto para a potência de usinagem (Fig 2-a) quanto para a vibração do processo (Fig. 2-b) durante o corte do material compósito.

A redução da variabilidade do processo de fresamento expressa através da maior amplitude da razão S/R observada indica que o avanço de 0,025 mm/dente e a rotação de 4000 rpm favoreceu a estabilidade do processo, possibilitando uma média de potência de 54 W. O aumento no ruído e consequente aumento na variabilidade para o avanço de 0,10 mm/dente e 8000 rpm indica direta proporcionalidade à velocidade e aumento na força de corte durante a usinagem o que impacta no ruído do processo. Ademais, foi constatado que a aplicação da ferramenta de hélice neutra (HN) também contribuiu para a redução do consumo de energia. A ferramenta com geometria neutra garantiu menor ocorrência de arrancamentos de fibras durante o corte, impactando favoravelmente a qualidade superficial obtida, com rugosidade média R_a de 1,50 μm .

A garantia da correlação da variabilidade com o sinal é inerente ao cálculo da razão sinal ruído em arranjos Taguchi, onde é considerada proporcionalmente a amplitude do sinal e seu ruído correspondente, mantendo assim a correlação entre resultados.

Em relação à vibração máxima captada durante o processo de fresamento, o avanço por dente de 0,025 garantiu menor ocorrência de picos vibracionais que podem induzir danos superficiais no material, prejudicando a estabilidade dimensional e induzindo a retirada descontínua de material durante o corte que pode induzir a delaminação das camadas do material. O valor de vibração obtido para tais condições foi de 3,5 mm/s.

Foi observado expressivo aumento da razão S/R ou seja redução na variabilidade com o menor nível dos parâmetros de corte assim como a geometria de hélice neutra para a redução da variação do sistema. O que indica menor ocorrência não somente de vibrações induzidas pela retirada de material, porém também proporciona a redução de vibrações auto-excitadas durante o processo. As vibrações livres inerentes ao processo ocorrem devido a força inicial de corte, entretanto as vibrações auto-excitadas são induzidas pela sobreposição ou combinação das forças internas de vibração (máquina-ferramenta) ou fontes externas de vibração quando duas ou mais vibrações forçadas entram em fase, aumentando muito a amplitude das forças envolvidas. A aplicação da ferramenta de hélice neutra também contribui para a maior estabilidade do processo e redução da vibração máxima do sistema, que garante a robustez do processo e reduzindo desgaste da ferramenta, e garantindo melhor qualidade superficial e produtividade.

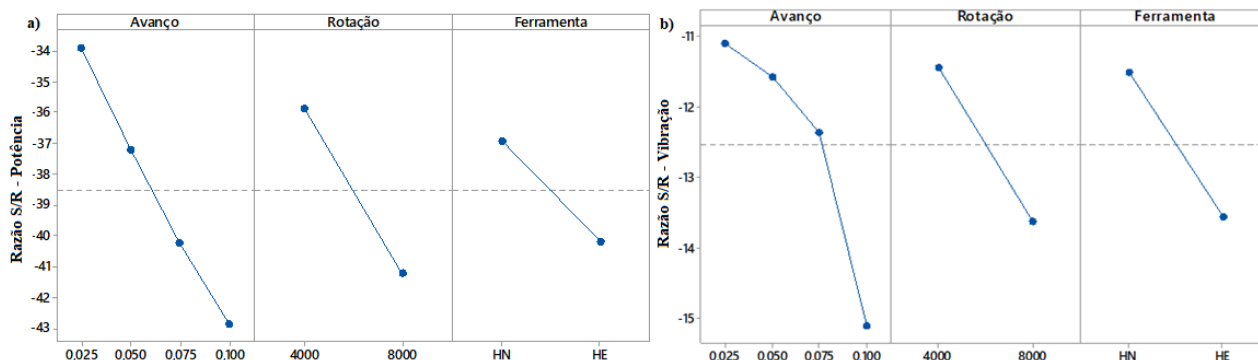


Figura 2. Efeitos principais da razão S/R para: a) Potência e b) Vibração durante processo de fresamento (Autoria Própria).

A análise da razão S/R além de avaliar a variabilidade, fornece o ranking das maiores influências na variável de saída analisada da potência de usinagem e vibração do processo. Na tabela de resposta para a razão S/R (Tabela 2), pode-se observar que o avanço aplicado é o parâmetro que mais influenciou no processo de usinagem em primeiro lugar, seguido pela rotação e pela geometria da ferramenta que ocupa o último lugar do rank de influências. Corroborando com os resultados ranqueados na tabela de resposta é possível também avaliar o delta (maior diferença obtida para o resultado de cada nível), sendo consequentemente o maior delta encontrado para o fator que mais contribuiu para aumento da variabilidade sendo o fator avanço f_z .

Similarmente para a vibração, na Tabela 3, o ranking de níveis considerados indica maior influência do avanço por dente, rotação e em terceiro lugar a geometria da ferramenta aplicada. É importante destacar a maior amplitude dos valores de delta para a potência de usinagem em relação à vibração, indicando maior impacto da variação dos fatores para a potência.

Em relação aos valores da ANOVA para o sinal de potência foram obtidos os seguintes valores de P para cada fator: para o Avanço (0,045), Rotação (0,021) e Ferramenta (0,033).

Pode-se portanto afirmar que tanto para a potência de usinagem e a vibração, o primeiro nível dos parâmetros de corte de avanço por dente e rotação favorecem a ocorrência de um processo com menor variabilidade (maior valor da resposta do sinal-ruído) com menor tendência a ocorrência de delaminações e avarias na superfície usinada, sendo a melhor condição definida em: avanço por dente f_z no nível 1 (0,025 mm/dente), rotação no nível 1 (4000 rpm) e aplicação da ferramenta de geometria no nível 1 (hélice neutra). Tais resultados confirmam as condições de corte otimizadas, com comportamentos similares na consideração de mais de uma variável de saída do processo.

Tabela 2. Tabela resposta para a razão S/R da potência de usinagem durante o processo (Autoria Própria)

Nível	Avanço f_z	Rotação	Ferramenta
1	-33,87	-35,87	-36,9
2	-37,20	-41,23	-40,18
3	-40,24	-	-
4	-42,88	-	-
Delta	9,01	5,36	3,27
Rank	1	2	3

Tabela 3. Tabela resposta para a razão S/R da vibração durante o processo (Autoria Própria)

Nível	Avanço f_z	Rotação	Ferramenta
1	-11,10	-11,44	-11,50
2	-11,58	-13,63	-13,57
3	-12,36	-	-
4	-15,11	-	-
Delta	4,01	2,19	2,06
Rank	1	2	3

4. CONCLUSÕES

Através da análise do processo de fresamento do compósito de matriz termoplástica Cetex TC 910 PA6 foi possível constatar que a potência consumida durante o processo e a vibração máxima sofreram influência significativa de todos os fatores considerados, sendo dentre eles, o avanço por dente f_z , o de maior impacto.

Com a aplicação da análise de sinal ruído foi possível observar que a variabilidade é reduzida quando o processo é executado nos menores níveis dos parâmetros de corte e utilizando a ferramenta de hélice neutra, sendo esta condição portanto a mais favorável ao corte e proporcionando maior estabilidade e além da redução da interferência do erro experimental no processo, assim como redução de picos vibracionais. A condição que favorece a redução da variabilidade do processo foi encontrada para a aplicação da ferramenta de hélice neutra com menores rotações de 4000 rpm.

A metodologia de otimização voltada a qualidade de Taguchi com ênfase na avaliação da variabilidade do processo provou ser adequada para o estabelecimento das melhores condições de corte para o compósito de matriz termoplástica garantido redução da variabilidade e danos durante o processo.

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

- ANTONY, J.; VILES, E.; TORRES, A. F.; PAULA, T. I. de; FERNANDES, M. M.; CUDNEY, E. A. Design of experiments in the service industry: a critical literature review and future research directions. *The TQM journal*, [s. l.], v. 32, n. 6, p. 1159–1175, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1108/tqm-02-2020-0026>.
- CALLISAYA, E.S., ALVES, M.C., SALUSSOLIA, G., LIMA, L. “Power Rating and Tools Wear in Milling of Hardened SAE 4340 Steel with Minimum Quantity of Fluid (MQF).” *Key Engineering Materials*, vol. 735, Trans Tech Publications, Ltd., pp. 24–28, 2017.
- CHANG, D. Y. et al. Cutting force, Vibration, and Temperature in Drilling on a Thermoplastic Material of PEEK. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2021.
- GHANI, A. F.; MAHMUD, J. Hardness, Tensile and Microstructure Assessment of carbon/Glass Hybrid Composite Laminate. *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 15, pp. 91-105, 2018.
- HEGDE, S.; SHENOY, B. S.; CHETHAN, K. N. Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance. *Materials today: proceedings*, [s. l.], v. 19, p. 658–662, 2019.
- ISMAIL, M. R.; ALI, Z. A. A. A.; L-WAILY, M. Delamination damage effect on buckling behavior of woven reinforcement composite materials plate. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, 18(5), 83-93. 2018.
- KARATAŞ, M. A; GÖKKAYA, H. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. *Defence technology*, [s. l.], 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dt.2018.02.001>.
- KARNA, S. K.; SAHAI, R.; (2012). An overview on Taguchi method. *International journal of engineering and mathematical sciences*, 1(1), 1-7, 2012.
- KONDO, M. Y., MONTAGNA, L. S., MORGADO, G. F. M., CASTILHO, A. L. G., BATISTA, L. A. P. 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: Ciência e Tecnologia*, 32(2), 2022.
- KUMAR, D.; GURURAJA, S. Machining damage and surface integrity evaluation during milling of UDCFRP laminates: Dry vs. cryogenic. *Composite structures*, [s. l.], v. 247, n. 112504, p. 112504, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112504>.
- MAZUR, R. L; Obtenção e caracterização de compósitos de fibras de carbono/PEKK com aplicações aeronáuticas. 253 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010.
- MONTAGNA, L. S., KONDO, M. Y., CALLISAYA, E. S., MELLO, C., SOUZA, B. R., LEMES, A. P., BOTELHO, E. C., COSTA, M. L., ALVES, M. C. S., RIBEIRO, M. V., REZENDE, M. C. A review on research, application, processing, and recycling of PPS based materials. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 32(1), 2022.
- RAMEZANI-DANA, H. et al. Experimental investigation of the mechanical behavior of glass fiber/high fluidity polyamide-based composites for automotive market. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 40, n. 21–22, p. 827–844, 2021.
- SHOKRANI, A.; DHOKIA V.; NEWMAN, S.T. "Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 57, pp 83-101, 2012.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

INVESTIGATION OF THE MILLING PROCESS OF THERMOPLASTIC CFRP_s USING THE TAGUCHI METHOD OF OPTIMIZATION

Emanuele Schneider Callisaya
Marcel Yuzo Kondo
Marcos Valerio Ribeiro

Michelle Leali Costa
Edson Cocchieri Botelho
Manoel Cleber de Sampaio Alves

São Paulo State University (Unesp), School of Engineering. Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, 12.516-410, Guaratinguetá-SP.
schneider.callisaya@unesp.br; marcel.kondo@unesp.br

Abstract. *Currently, the machining of composite components faces several challenges in the industrial environment. Among the main difficulties of high occurrence the damages that can appear in the material during the machining process, such as delamination, in addition to the accentuated wear of cutting tools, compromising the fatigue life, especially important for structural components. In this study, the machining process by milling of the thermoplastic matrix composite Cetex TC 910 PA6 was analyzed with the application of two geometries of diamond coated carbide tools (with neutral helix and 8° left helix). During the milling tests, the cutting parameters were varied at different levels (feed per tooth and rotation) according to Taguchi L8 experimental design. After tests, a statistical analysis of variance was performed between the input variables of the process and the vibration and power during machining, with optimization through the analysis of averages and signal-to-noise in order to determine the analysis of the influence of the factors on the vibration of the process and identification of the best machining condition as well as the most suitable tool geometry according to Taguchi's quality-oriented optimization methodology with emphasis on the evaluation of process variability. From the results, after machining, a progressive increase in vibrational peaks was observed with the increase in feed per applied tooth, as well as an increase in amplitude with rotation. The applied statistical analysis indicated that the reduction of process variability was favored for the application of the neutral helix tool with lower rotation of 4000 rpm.*

Keywords: *Power consumption; Vibration; CFRP; Carbon fiber; Milling.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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