

ANÁLISE COMPARATIVA DO PROCESSO DE ROSQUEAMENTO DO COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO E DA LIGA DE ALUMÍNIO 7075-T6 COM DIFERENTES SISTEMAS DE FIXAÇÃO

Samuel Alves de Freitas, samuelengmec@gmail.com¹
Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufsj.edu.br¹
Thiago Castro Freitas, thiagocastrofreitas@hotmail.com¹
Wasley Amaral Coelho, wasleyamaral@hotmail.com¹
Lincoln Maia Teixeira, lincoln_ufsj2009@hotmail.com¹

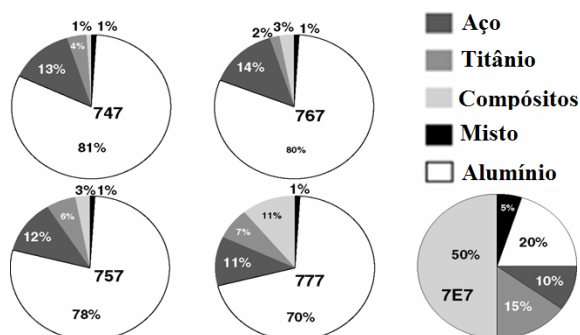
¹Universidade Federal de São João Del Rei, Praça Frei Orlando, 170, Centro, São João Del Rei, Minas Gerais, CEP 36307-352.

Resumo: A usinagem em materiais compósitos, laminados ou particulados, tem se desenvolvido nos últimos anos. O corte nesse material é considerado um desafio, pois apesar desses materiais apresentarem excelentes propriedades físicas e mecânicas, pode ocorrer danos à peça durante a sua usinagem, como por exemplo, no caso da furação, a delaminação. Entretanto o processo de rosqueamento é novidade para aplicação em compósitos. O emprego de ferramentas de aço rápido (HSSE), com ou sem cobertura, tem sido considerado uma solução atrativa para usinagem desses materiais, devido a alta aplicabilidade dessas ferramentas nos processos industriais. No presente trabalho, foram investigados os esforços de corte em ferramentas com cobertura de Nitreto de Titânio (TiN) e sem cobertura no processo de rosqueamento em compósitos laminados de fibra de carbono em matriz plástica de resina epóxi (FCRP). Os resultados foram comparados com o rosqueamento da liga de alumínio aeronáutico 7075-T6 nas mesmas condições de usinagem, pois este material vem sendo substituído pelo compósito e seus resultados poderão servir de base comparativa para a usinagem do compósito. Além disso, foi realizada uma análise empregando dois sistemas de compensação axial e níveis de velocidade. Um planejamento fatorial completo foi utilizado para analisar o desempenho dos esforços de corte, avaliando as características de cada fator e seus respectivos níveis. Os resultados indicaram diferentes desempenhos da ferramenta com cobertura TiN nos esforços de corte de acordo com o material trabalhado. Os sistemas de compensação axial mostraram ser significantes, variando a resposta dos esforços de acordo com o material trabalhado, cobertura de ferramenta e velocidade aplicada.

Palavras-chave: Compósito laminado, Fibra de Carbono, Rosqueamento, Cobertura de ferramenta

1. INTRODUÇÃO

O campo da aviação tem aumentado a demanda de estudos nos processos de usinagem dos materiais compósitos em particular o laminado de Fibra de Carbono Reforçado Plasticamente (FCRP), que por agregar propriedades mecânicas desejadas aos componentes como a baixa densidade e resistência a corrosão, apresentam também versatilidade em suas funções estruturais. Os compósitos são referência como uma solução para redução de peso e consumo de combustíveis na indústria aeronáutica. A investigação da usinagem desses materiais é considerada a fonte para o aumento da sua aplicação, pois o corte de materiais de FCRP apresentam peculiaridades e defeitos exclusivos, como o arrancamento das fibras e a delaminação. Apresentado inicialmente por Warren (2004) e posteriormente pelos autores Dursun; Soutis (2014), a Fig. (1) representa como os materiais compósitos vêm substituindo os materiais de ligas metálicas nas estruturas das aeronaves comerciais de grande porte 747, 757, 767, 777 e 7E7 fabricadas pela Boeing^(R) no ano de 2004.



**Figura 1. Aumento da utilização de compósitos que vem substituindo o alumínio em aeronaves Boeing^(R).
(Fonte: Adaptado de WARREN, 2004).**

Os componentes de compósitos FCRP aplicados a esse setor são laminados em moldes metálicos, proporcionando a elaboração de peças que conferem boa tolerância dimensional e ampla versatilidade de forma, características bastante requeridas nas montagens de componentes aeronáuticos. Além disso, as maiores vantagens dessa aplicação são, baixa densidade, redução do número de partes na montagem, facilidade na fabricação de peças complexas e boa resposta para a fadiga M'Saoubi et al., (2015; Soutis, (2005).

A furação ou rosqueamento é uma importante etapa na fabricação dos componentes, visto que essas operações são executadas nas fases finais da fabricação das peças apresentando assim um valor agregado do item Durão, (2013). Ainda sabe-se que as montagens entre peças requerem exatidão geométrica e dimensional, por isso, é evidente que pesquisas investem recursos com o objetivo de eliminar a ocorrência de folgas e interferências durante as montagens de componentes Pereira et al., (2016). O que neste caso é observado é que os problemas nesta etapa de produção das peças geram desperdícios significativos. Por isso, a redução dos gastos e de paradas indesejadas a uma linha de produção tem sido buscada com o desenvolvimento de ferramentas que operam com elevadas velocidades de corte sem comprometer o acabamento. Além disso, a eficiência e o tempo de vida da ferramenta são monitorados, pois as trocas das ferramentas nas etapas de rosqueamento geram uma perda de tempo significativa Saito et al., (2016). Autores como Royer; Merson (2015), Xu; An; Chen (2015) avaliaram os esforços de corte como a força axial e o torque, desenvolvendo os processos e entendendo os fenômenos da usinagem dos materiais, auxiliando na redução das perdas e problemas gerados pela usinagem.

Embora os laminados de FCRP apresentem excelentes propriedades mecânicas, como resistência física e vida de fadiga, é necessário investigar as técnicas e os parâmetros de usinagem para atingir qualidade e eliminar o risco de que esses materiais venham a falhar quando em operação, garantindo assim a segurança dos componentes. Os materiais compósitos são constituídos de mais de uma fase, por isso eles apresentam características heterogêneas e anisotrópicas que são geradas devido às diferentes fases de seus constituintes que quando somadas a mudanças térmicas geradas pelo processo de usinagem, a ocorrência de defeitos é observada, estas e outras características fazem com que esses componentes apresentem peculiaridades em sua usinagem (Durão et al., 2004; Gaitonde et al., 2008; Hintze Wolfgang; Hartmann; Schitte, 2011; Hoceng; Tsao, 2006; Shyha et al., 2010; Tavares et al., 2010).

Os defeitos gerados pela usinagem nos laminados de FCRP estão relacionados a diversos atributos do corte, tais como os tipos de coberturas de ferramentas e velocidades empregadas no processo. Além disso, as características do material trabalhado geram grandes influências nas respostas obtidas pela usinagem, uma característica importante para os materiais FCRP é a infinita possibilidade de disposição dos reforços, como por exemplo, o caso do reforço em fibra que é o mais aplicado, onde suas principais utilizações são com as fibras unidirecionais e bidirecionais. Autores como Chen (1997) investigou a influência desta escolha nos resultados dos esforços de corte e qualidade do produto final e observou que a usinagem do FCRP com a configuração bidirecional em suas fibras apresentam as melhores respostas quanto aos defeitos do processo. Devido ao alinhamento dos resultados dos esforços como força axial e torque gerados no processo, estas respostas indicam as condições do corte e apontam quais características devem ser analisadas para reduzir os esforços e consequentemente os danos a peça Abhishek; Datta; Mahapatra, (2014).

Uma característica no processo de rosqueamento é o sincronismo na rotação da ferramenta junto ao deslocamento vertical do eixo da máquina, esta programação entre os dois movimentos é realizada pelo *software* das máquinas de comando numérico (CNC), porém mesmo com a precisão do sistema, ele não é passível de pequenos erros e a ocorrência deles pode comprometer a qualidade e a tolerância dimensional do perfil da rosca, sendo essa particularidade considerada em estudos anteriores como um atributo essencial para alcançar uma boa rigidez do perfil rosqueado (Ahn et al., 2003; Chen; Pan; Chou, 2012). Os erros provenientes do sincronismo, devido a dinâmica do processo levam a ferramenta e a superfície rosqueada a experimentar uma força de interação inconstante, podendo elaborar um passo do perfil roscado sem continuidade e inconsistente, além de estar relacionado com a quebra da ferramenta dentro do furo, ocasionando em uma perda da peça, ferramenta e um atraso em uma linha de produção. Devido a fragilidade durante a usinagem dos materiais FCRP, no rosqueamento o sistema de compensação axial pode ser extremamente influente no dano desenvolvido durante o corte.

Um dos pontos de investigação aplicado a usinagem do material FCRP é a influência da velocidade de corte nas respostas aos danos. Autores apontam que esse fator é um ponto de investigação para uma melhor resposta aos danos e suas extensões significando em redução das taxas de reprovação de componentes produzidos em FCRP (Karnik et al., 2008; Krishnaraj et al., 2012). Os danos gerados no processo são considerados critérios de referência para a aceitação dos componentes. A análise de dano no perfil de roscas obtidos no processo de rosqueamento com macho de corte em FCRP e comparado com a liga de alumínio 7075-T6 pode enriquecer os critérios de utilização dos compósitos, sendo esse o objetivo de grande parte da indústria aeronáutica.

Neste trabalho foram analisados os esforços gerados por ferramentas sem e com cobertura de Nitreto de Titânio (TiN) no rosqueamento do compósito FCRP curado em autoclave. E em paralelo comparado com as respostas da liga de alumínio 7075-T6, ambos os materiais são amplamente difundidos na indústria aeronáutica, ao longo dos anos tem-se notado uma substituição das ligas de alumínio pelo FCRP em algumas estruturas, principalmente na fuselagem. Porém

ainda assim o material FCRP demanda de estudos sobre seu rosqueamento para melhor entendimento dos defeitos e da qualidade do perfil rosqueado. Foram empregadas diferentes velocidades de corte e sistemas de compensação axial, em condições de corte a seco. Com o objetivo de comparar as condições e confrontar a qualidade e os danos do processo de rosqueamento destes materiais, o que futuramente pode possibilitar maior a aplicação do FCRP em componentes aeronáuticos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, réguas do laminado FCRP de aproximadamente 5 mm de espessura e 1 m de comprimento foram produzidos pela empresa ALLTEC Compósitos. Com fibra de carbono, orientação de 0/90 e tecida do tipo cross-ply, gramatura de 200g/cm³ e porcentagem de 55% em fibra, curadas em autoclave (120°C e 30 psi).

A furação necessária para posterior usinagem do perfil roscaado foi realizada sem fluido de corte por uma broca helicoidal de 4,2 mm de diâmetro, com duas arestas de corte em duplo ângulo e ângulo de ponta de 118°, sem cobertura e comprimento útil de 42 mm (Dormer HSS Jobber Drill). Tal diâmetro leva a 84% do diâmetro final da rosca e todas as borcas utilizadas pertencessem ao mesmo lote.

Os perfis roscaados foram fabricados com a utilização de machos ferramenta do tipo M5-ISO2/6H Rekord 1B-VA HSSE com cobertura de TiN e sem cobertura. Estas ferramentas são compostas de 3 arestas de corte e uma entrada de 4-5 fios fabricados pela Emuge-Franken de acordo com a norma DIN-13. Além disso, os ensaios de rosqueamento foram realizados com dois sistemas de compensação axial, o sistema de compensação axial A do tipo semirrígido, cuja compensação atua apenas em um sentido do eixo vertical, com aplicação em centros de usinagem, máquinas fresadoras e em tornos e o sistema de compensação axial do tipo B, flutuante, com compensações em ambos os sentidos do eixo vertical e com aplicação restrita a centros de usinagem e fresadoras.

Á máquina com Comando Numérico Computadorizado (CNC) com três eixos da empresa ROMI modelo Discovery 560 com rotação e potência máxima de 10.000 RPM e 15 KW, foi utilizada na confecção dos corpos de prova e no desenvolvimento dos experimentos, sendo a mesma equipada com um *software* de controle numérico modelo Siemens 810D Sinumeric, responsável pelo sincronismo entre os movimentos de rotação e avanço da ferramenta. A distância para início de rotação do eixo vertical foi configurada para iniciar em 10 mm antes da entrada no material de trabalho, garantindo total aceleração da ferramenta. Todas as operações foram realizadas a seco.

Os corpos de prova foram preparados a partir do fresamento de pequenos quadrados do compósito fixos em uma matriz metálica de formato hexagonal, que serviu como gabarito da programação da máquina, o fresamento foi realizado utilizando o menor passo possível e uma velocidade de rotação considerável alta, isso para evitar a ocorrência de danos as laterais do corpo de prova hexagonal, como lascamentos e/ou arrancamento das fibras do material FCRP e rebarbas na liga de alumínio. Os corpos de prova foram fabricados sem a utilização de fluidos de corte. A Figura (2) ilustra a confecção dos corpos de prova hexagonais.

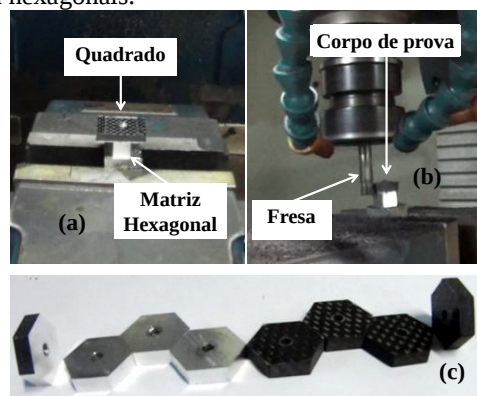


Figura 2. Fabricação dos corpos de prova hexagonais, (a) corpo de prova quadrado, (b) fresamento, (c) corpo de prova hexagonal. (Fonte: autoria própria).

Posteriormente os corpos de prova hexagonais foram presos em um dispositivo específico para o corpo de prova hexagonal fixado no dinamômetro, foi exigido uma tolerância entre o corpo de prova hexagonal e o dispositivo, e para evitar uma possível movimentação do corpo de prova dentro do dispositivo foi utilizado uma tampa com um perfil roscaado que foi fixado ao dispositivo e manteve o corpo de prova de forma rígida e firme dentro do dispositivo, evitando também um desalinhamento horizontal do corpo de prova. A Figura (3) mostra o dispositivo fixo ao dinamômetro.

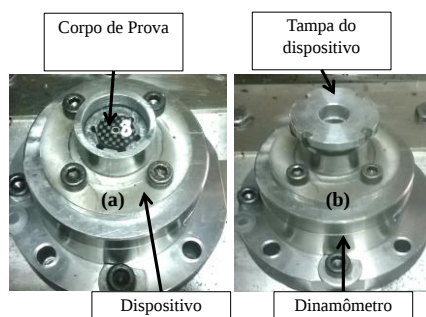


Figura 3. Dispositivo fixo ao dinamômetro, (a) sem a tampa, (b) com a tampa de fixação. (Fonte: autoria própria).

Para um melhor entendimento da diferença na rugosidade das ferramentas utilizadas, foi realizado um ensaio de rugosidade nas ferramentas. Utilizou-se o rugosímetro Taylor Hobson PGI 1240, e um cut-off de $0,25 \mu\text{m}$ de acordo com a norma ISO 1997, varrendo uma área de 5 mm de comprimento. Sendo realizadas três medições nas mesmas condições para cada ferramenta. Onde foi encontrado os valores médios das três medidas de R_a para a ferramenta com cobertura de $R_a = 0,1032 \mu\text{m}$ e $R_a = 0,0601 \mu\text{m}$ para a ferramenta sem cobertura.

2.1. Planejamento de Experimentos

O planejamento de experimentos é essencial para determinar e examinar o comportamento de dois ou mais fatores e identificar o fator de maior significância em um determinado experimento. O projeto fatorial foi definido a partir de todas as combinações possíveis dos fatores (k) e seus respectivos níveis (n) do experimento, resultando em um fatorial n^k (MONTGOMERY, 2006). O planejamento de experimentos foi baseado na aleatoriedade dos experimentos eliminando observações redundantes e reduzindo o numero final de testes, refinando a resposta das interações entre as variáveis.

Os testes de rosqueamento foram realizados em um centro de usinagem CNC com duas velocidades de corte, dois sistemas de compensação axial e duas coberturas de ferramenta. A velocidade de corte considerada neste trabalho foi a velocidade tangencial, que é dependente do diâmetro externo da ferramenta e o numero de rotações por minuto (RPM) programado no centro de usinagem CNC. O planejamento de experimentos foi desenvolvido para determinar os efeitos de cada fator de entrada nas seguintes respostas: Força Axial (N) e Torque (N.m). O fatorial completo do tipo 2^3 foi proposto para avaliar as respostas da força axial e torque no rosqueamento do alumínio e do compósito foi utilizado três réplicas para cada condição e descartado um dos valores. A velocidade de corte utilizada foi considerada de acordo com as informações do catálogo do fornecedor das ferramentas e foi utilizada a mesma para ambos os materiais. Os sistemas de compensação axial utilizados são A e B. A Tab. (1) apresenta os fatores e níveis para o processo de rosqueamento.

Tabela 1. Fatores e níveis para experimento de rosqueamento.

Fator	Níveis	
Cobertura	Sem	TiN
Velocidade de corte (m/min)	5	15
Sistema de compensação	A	B

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise de variância (ANOVA) foi utilizada para avaliar a influência de um e/ou mais fatores nas variáveis respostas, mostrando se o fator principal e/ou a interação entre os fatores foram estatisticamente significantes no intervalo de confiança de 95%. A Tab. 2 exibe os resultados da ANOVA para o torque e força axial, nos experimentos do compósito e alumínio 7075-T6.

Os resultados experimentais são descritos através dos gráficos de efeito principal e interação, onde são apresentadas a variação e a significância dos efeitos. Os gráficos de efeitos e interações ilustram os fatores que influenciam os resultados dos experimentos e a variação significativa desses valores no processo. A interação existe quando a variação média da resposta depende do nível de outro fator. É possível visualizar o efeito da interação de dois ou mais fatores do experimento sobre a variável resposta nos gráficos de interação, permitindo uma ou mais comparações da relativa significância dos efeitos Montgomery, (2006).

Os valores em negrito na coluna do P-valor na Tab. (2) representam os fatores e interações significativas sobre as respostas. Os valores sublinhados indicam os gráficos que foram apresentados, a escolha dos gráficos é realizada devido a análise da interação se a interação foi significativa não precisamos avaliar o fator principal uma vez que o seu efeito se repete na interação. O valor de R^2 (ajustado) exibido na ANOVA apresenta a proporção em que o modelo de previsão pode prever as respostas para novas observações. O coeficiente de determinação (R^2) fornece a medida da variabilidade observada nos valores das respostas que pode ser explicada pelos fatores controláveis e suas interações. Um coeficiente próximo de 100% sugere um modelo com ótima predição.

Tabela 2. Análise de variância (ANOVA) para a força axial e torque.

Fatores	Carbono				7075-T6			
	Torque [N.m]		Força Axial [N]		Torque [N.m]		Força Axial [N]	
	F	P-valor	F	P-valor	F	P-valor	F	P-valor
Velocidade [m/min]	35,57	0,000	9,64	0,015	0,34	0,576	2,75	0,136
Cobertura	46,33	0,000	132,02	0,000	82,92	0,000	76,86	0,000
Sistema de Compensação Axial	1,13	0,319	53,21	0,000	2,72	0,137	32,18	0,000
Velocidade [m/min]*Cobertura	1,26	0,293	4,45	0,068	4,18	0,075	10,03	0,013
Velocidade [m/min]*Sistema de Compensação Axial	0,00	0,966	20,85	0,002	0,56	0,476	1,78	0,219
Cobertura*Sistema de Compensação Axial	3,99	0,081	93,35	0,000	22,76	0,001	25,62	0,001
Velocidade [m/min]*Sistema de Compensação Axial*Cobertura	2,01	0,194	0,21	0,661	2,28	0,169	7,10	0,029
R^2 ajustado	84,74%		95,34%		87,88%		90,87%	

3.1.1. Análise das Respostas do FCRP

O parâmetro F mostra que a cobertura de ferramenta é o fator mais significativo nas variáveis respostas força axial e torque no rosqueamento do compósito FCRP.

3.1.1.1. Força Axial

De acordo com a Tab. (2) a velocidade de corte, cobertura, sistema de compensação axial e a interação entre velocidade com sistema de compensação e cobertura com sistema de compensação são significativos sobre a força axial para o FCRP.

A força axial é o resultado da decomposição de outras forças, como a de atrito e a força de corte. Além disso, a relação da velocidade com o sistema de compensação axial ocorre devido ao fato da força axial poder ser influenciada pelos erros de sincronismo entre o movimento de rotação da ferramenta e seu respectivo avanço. Em estudo recente de rosqueamento os autores notaram que o sincronismo é dependente da velocidade de corte Pereira et al., (2016).

A Figura (2) exibe o resultado da interação da velocidade com o sistema de compensação axial nos valores médios da força axial. Nota-se que para o sistema de compensação axial B, a velocidade de 5 m/min apresentou uma força axial de 12,89% maior que a velocidade de 15 m/min. Sendo para o sistema de compensação axial A, a velocidade de 15 m/min apresentou um valor de 35,30% maior na força axial se comparado com a velocidade de 5 m/min para o mesmo sistema. O sistema de compensação axial B, é flutuante o que significa que sua compensação atua no sentido negativo e positivo do eixo vertical, sabe-se que tanto no corte, na parada e no retorno da ferramenta o sistema de compensação atua na forma de minimizar os esforços em cada operação realizada pela ferramenta, para o sistema B, essa compensação mostrou-se mais eficiente, devido as menores variações da média da força axial.

Para o sistema semirrígido somado a velocidade de 15 m/min ao realizar o corte de um material abrasivo e heterogêneo, apresentou uma força axial maior, sendo assim, entende-se que o sistema de compensação axial A é apresentado uma maior resistência ao corte, pois o corte da fibra de carbono é considerado como a deterioração da mesma pelo atrito entre ferramenta e peça, pois a fibra de carbono é feita a partir de um material extremamente rígido e seu corte é por muita vezes entendido como a quebra entre as fibras e não corte propriamente dito como ocorre no alumínio. A diferença do modo de elasticidade entre a fibra e resina causa diferentes deformações elásticas, por isso, o diâmetro do furo varia para cada camada do laminado ao longo do furo Liu; Tang; Cong, (2012). Essa variação de resistência entre materiais é mais bem absorvida pelo sistema de compensação axial B.

Analisando a velocidade de 15 m/min, nota-se uma diferença de 54,59% na força axial de acordo com o sistema de compensação axial empregado. No trabalho de Ahn et al., (2003), os autores observaram os efeitos dos erros de sincronismo no desempenho do rosqueamento em altas velocidades de corte, variando entre 18 m/min e 75 m/min. E

observaram que os erros podem quebrar a ferramenta e ainda que o sincronismo influencia diretamente as características de corte de um perfil roscado, sendo esses erros ligados a velocidade empregada ao processo. Os autores Chen; Pan; Chou, (2012), trabalharam em um algoritmo de controle dos erros de sincronismo reduzindo as forças de interação entre ferramenta e peça.

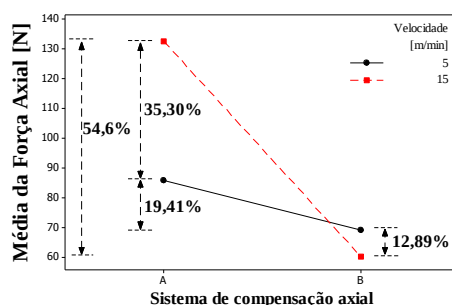


Figura 2. Média da força axial para as velocidades de 5 e 15 m/min com os sistemas de compensação axial A e B.

A Figura (3) mostra a interação entre o sistema de compensação axial e a cobertura da ferramenta na resposta do valor médio da força axial. Para o sistema de compensação axial B a ferramenta sem cobertura apresentou um valor para a força axial de 15,88% maior do que na ferramenta com cobertura TiN. No sistema de compensação A ferramenta sem cobertura apresentou um valor de 74,30% maior para a força axial se comparado com a ferramenta de cobertura TiN. Ainda é possível observar que a troca do sistema de compensação B para o sistema A na ferramenta sem cobertura ocorreu um aumento de 59,56% para a força axial e para a ferramenta com cobertura essa troca ocasionou em uma queda de 24,45% da força axial e a ferramenta com cobertura TiN apresentou os menores resultados para a força axial.

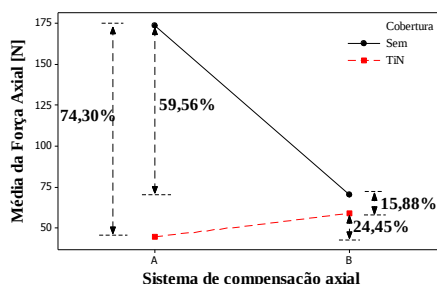


Figura 3. Média da força axial para os sistemas de compensação axial A e B e ferramentas com cobertura e sem cobertura.

3.1.1.2. Torque

De acordo com a Tab. (4) apenas os fatores principais velocidade de corte e cobertura apresentam serem significativos sobre o torque para o compósito. Os autores Pereira et al., (2016), avaliaram o torque no processo de rosqueamento de três diferentes tipos de ferro de fundido, com três velocidades de corte, 20 m/min, 35 m/min e 75 m/min e dois tipos de lubrificantes, MQL e Emulsão, e notaram que o aumento da velocidade reduz o torque. Além disso, explicam que o torque é o resultado das forças de corte na operação realizada por cada aresta cortante da ferramenta. O torque é a soma da força de corte vezes o raio da ferramenta, somado as porções da força de atrito. A porção do torque originada do atrito pode ser prevista durante o retorno da ferramenta, mesmo sem a realização do corte, é notada a presença de torque no eixo da máquina. Tal torque pode representar a influencia do atrito entre ferramenta e peça.

A Figura (4) exibe os valores médios do torque para as velocidades investigadas. É possível observar que o aumento da velocidade reduz o valor médio do torque medido. O aumento de 5 m/min para 15 m/min na velocidade gerou uma redução de 23,65% do valor médio do torque. Considerando a vida de ferramenta e de acordo com os parâmetros de usinagem, a velocidade de 15 m/min apresenta a melhor usinabilidade do compósito se comparada com a de 5 m/min. Pois é conhecido que grandes valores para o torque podem danificar a ferramenta de rosqueamento. O fato que explica essa diferença no torque é o coeficiente de atrito, maiores velocidades implicam em menores coeficientes de atrito. Na furação do compósito FCRP constatou-se que o aumento da velocidade reduz o atrito, devido ao aumento da temperatura no local usinado, ocasionando em uma possível queda na resistência da resina.

Os autores Abhishek; Datta; Mahapatra, (2014), buscaram em seu trabalho os parâmetros ótimos para reduzir a força axial e o torque na furação do compósito FCRP, com o objetivo de reduzir o defeito provocado pela delaminação do laminado. Para essa análise foi avaliado cinco diferentes velocidades de corte e três diferentes diâmetros de furos e também variadas taxas de avanço. Com isso foi possível observar que o aumento da velocidade reduz o torque, sendo constatado que o efeito da velocidade no torque é justificado pelo impacto negativo na taxa de deformação sobre a habilidade da matriz de transferir o carregamento para o reforço, assim podemos explicar porque o torque reduz com o aumento da velocidade, ou seja, uma baixa velocidade de corte implica em baixas taxas de deformação e longos períodos de usinagem, concluindo que menores velocidades permite a transferência de carregamento da força entre matriz e reforço.

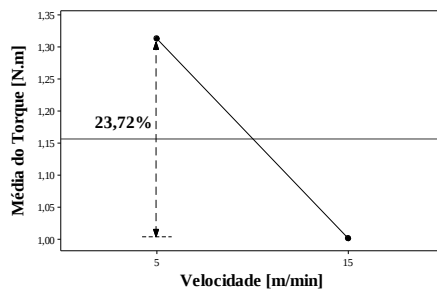


Figura 4. Média do torque para a velocidade.

A Figura (5) mostra a resposta média do torque para a cobertura da ferramenta, sendo para ferramenta com cobertura TiN a resposta ao torque foi 26,60% menor do que para a ferramenta sem cobertura. De acordo com a cobertura da ferramenta tem-se um coeficiente de atrito que é o resultado da interação entre a ferramenta e o material de trabalho.

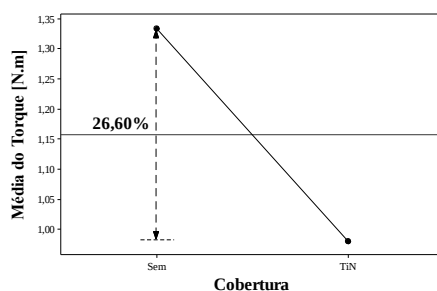


Figura 5. Média do torque para a cobertura.

3.1.2. Liga de Alumínio 7075-T6

O parâmetro F mostra que a cobertura de ferramenta é o fator mais significativo nas variáveis respostas força axial e torque no rosqueamento da liga de alumínio 7075-T6.

3.1.2.1. Força Axial

De acordo com a Tab. (4) a cobertura, sistema de compensação axial, a interação entre velocidade e cobertura, a interação entre cobertura e sistema de compensação axial e a interação entre velocidade com sistema de compensação axial e cobertura foram significativos sobre a força axial para o rosqueamento da liga de alumínio 7075-T6.

A Figura (6) exhibe os resultados da interação de terceira ordem para a resposta média da força axial. É possível observar que, para a ferramenta sem cobertura a velocidade de 5 m/min apresentou uma resposta de 15,37% maior na força axial, sendo para a ferramenta com cobertura TiN a velocidade de 15 m/min apresentou uma resposta maior de 23,83% na força axial. Para o sistema de compensação axial B a diferença na resposta da força axial para a velocidade de 15 m/min foi de 1,96% maior do que a resposta para a velocidade de 5 m/min. O sistema de compensação axial A apresentou uma resposta de 27,71% maior do que para a velocidade de 5 m/min para a força axial. O Sistema de compensação axial B para a ferramenta com cobertura apresentou uma resposta de 59,60% maior para a força axial e no sistema de compensação axial A para ferramenta com cobertura TiN apresentou um valor de 29,71% maior. Nota-se que para a ferramenta com cobertura TiN os valores médios da força axial foram maiores para o processo de rosqueamento do alumínio 7075-T6.

Recente estudo observa que a escolha da cobertura correta pode reduzir não apenas os esforços de usinagem, mas também na formação de emaranhado de cavaco que adere a ferramenta, decorrente do rosqueamento de materiais

metálicos, sendo um empecilho para o processo, pois pode danificar a ferramenta e a peça, além de promover um atraso na produção, devido a necessidade de interrupção do processo para remoção do emaranhado de cavaco preso na ferramenta. Além disso, um ponto de atenção é o efeito do aumento da velocidade quando utilizado ferramentas com cobertura, essa combinação tende a aumentar o valor médio da força axial (SAITO et al., 2016).

O aumento da velocidade aumenta a temperatura, o que causa em um aumento da ductilidade do material, porém esse aumento de velocidade leva ao aumento na taxa de deformação no plano de cisalhamento do cavaco, alterando a morfologia do cavaco Hamade; Ismail, (2005).

O sistema de compensação axial A é semirrígido o que reduz a sua capacidade de absorção de energia e aumenta o seu impacto no corte e a capacidade da ferramenta em gerar cisalhamento no material, apresentando uma dinâmica de corte mais estável.

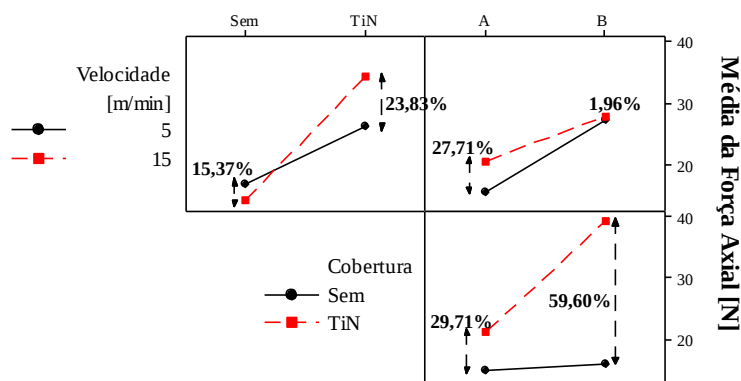


Figura 6. Média da força axial para a velocidade, cobertura e sistema de compensação axial.

3.1.2.2. Torque

De acordo com a Tab. (4) a cobertura e a interação entre cobertura com sistema de compensação apresentam serem significativos sobre os valores médios do torque para o rosqueamento da liga de alumínio 7075-T6.

A Figura (7) mostra o resultado da resposta torque para a interação entre a cobertura da ferramenta e o sistema de compensação axial. A ferramenta com cobertura TiN apresentou os maiores valores para o torque, para o sistema de compensação axial A a ferramenta com cobertura TiN apresentou uma resposta no torque de 17,56% maior para o torque se comparado com a ferramenta sem cobertura. Para o sistema de compensação axial B a ferramenta com cobertura apresentou um valor de 49,89% maior para o torque. A mudança do sistema de compensação A para o B provocou um aumento no torque de 11,21% para a ferramenta com cobertura, sendo para a ferramenta sem cobertura essa mudança provocou uma queda de 31,54% no torque.

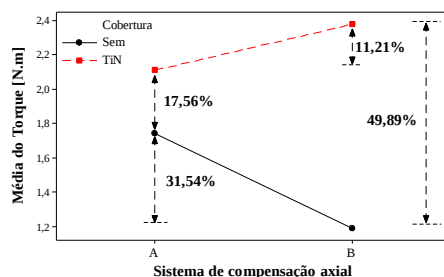


Figura 7. Média do torque para o tipo de cobertura da ferramenta.

4.

5. CONCLUSÃO

Com este trabalho é possível notar que existe diferença nas respostas e nas interações dos fatores e seus níveis de acordo com o tipo de material usinado. Essa dinâmica de interação entre ferramentas, sistemas e material de trabalho, permite que concluir que:

- Defini-se que a cobertura de ferramenta influencia na resposta do torque e da força axial de acordo com o tipo de material trabalhado no processo de rosqueamento.

- O sistema de compensação axial apresentou ser significativos nos valores médios da força máxima axial para o rosqueamento do compósito.
- A ferramenta sem cobertura apresentou os maiores valores para a força axial na usinagem do compósito.
- Na usinagem da liga de alumínio 7075-T6 a velocidade de 15 m/min com a ferramenta com cobertura TiN apresentou os maiores valores para a força axial. A ferramenta com cobertura TiN apresentou os maiores valores da força axial se comparada com a ferramenta sem cobertura.
- Para o compósito o sistema de compensação axial B (flutuante) apresentou os menores valores da força axial. Para a liga de alumínio o sistema de compensação axial A (semirrígido) apresentou os menores valores da força axial.
- A ferramenta com cobertura TiN apresentou o menor torque na usinagem do compósito e a ferramenta sem cobertura apresentou o menor torque na usinagem da liga de alumínio 7075-T6.

6. AGRADECIMENTOS

Ao grupo de pesquisa CIMS, em especial ao Camilo Lelius, Prof. Dr. Lincoln Cardoso Brandão e Sergio Luiz Moni Ribeiro. A empresa Emuge pelo fornecimento das ferramentas do projeto. A minha namorada Raquel Gomes de Oliveira.

7. REFERÊNCIAS

- Abhishek, K.; Datta, S.; Mahapatra, S. S. Optimization of thrust, torque, entry, and exist delamination factor during drilling of CFRP composites. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 76, n. 1–4, p. 401–416, 2014.
- Ahn, J. H. et al. Effects of Synchronizing Errors on Cutting Performance in the Ultra-High-Speed Tapping. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 52, n. 1, p. 53–56, 2003.
- Chen, S. L.; Pan, C. I.; Chou, C. Y. Reduction of synchronous errors in rigid tapping by iterative learning control. **IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM**, p. 467–471, 2012.
- Chen, W.-C. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 37, n. 8, p. 1097–1108, 1997.
- Durão, L. Dano na furação de placas carbono/epóxico. **Revista ...**, v. 17, p. 27–38, 2013.
- Durão, L. M. P. et al. Estudo da furação de laminados carbono-epóxico com diferentes brocas. **4ªs Jornadas Politécnicas de Engenharia**, 2004.
- Dursun, T.; Soutis, C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. **Materials and Design**, v. 56, p. 862–871, 2014.
- Gaitonde, V. N. et al. Taguchi Approach for Achieving Better Machinability in Unreinforced and Reinforced Polyamides. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 27, n. 9, p. 909–924, 2008.
- Gaitonde, V. N. et al. A study aimed at minimizing delamination during drilling of CFRP composites. **Journal of Composite Materials**, v. 45, n. May, p. 2359–2368, 2011.
- Hamade, R. F.; Ismail, F. A case for aggressive drilling of aluminum. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 166, n. 1, p. 86–97, 2005.
- Hintze, W.; Hartmann, D.; Schitthe, C. Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) - An experimental study. **Composites Science and Technology**, v. 71, n. 15, p. 1719–1726, 2011.
- Hocheng, H.; Tsao, C. C. Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 12–13, p. 1403–1416, 2006.
- Karnik, S. R. et al. Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model. **Materials & Design**, v. 29, n. 9, p. 1768–1776, 2008.
- Krishnaraj, V. et al. Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 4, p. 1791–1799, 2012.
- Liu, D.; Tang, Y.; Cong, W. L. A review of mechanical drilling for composite laminates. **Composite Structures**, v. 94, n. 4, p. 1265–1279, 2012.
- M'saubi, R. et al. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.002>>
- Montgomery, D. C. Design and Analysis of Experiments. **Technometrics**, v. 48, n. 1, p. 158–158, fev. 2006.
- Pereira, I. C. et al. Analysis of tapping process in three types of cast iron. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 82, n. 5–8, p. 1041–1048, 2016.
- Royer, R.; Merson, E. Influence of workpiece constituents and cutting speed on the machinability parameters in CFRP drilling. v. 140, n. June, p. 621–629, 2015.
- Saito, Y. et al. Effect of friction at chip–tool interface on chip geometry and chip snarling in tapping process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 107, p. 60–65, 2016.
- Shyha, I. et al. Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fibre

reinforced plastic composites. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 8, p. 1023–1034, 2010.
Soutis, C. Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction. **Materials Science and Engineering A**, v. 412, n. 1–2, p. 171–176, 2005.
Tavares, M. R. S. et al. Avaliação da delaminação após furação em compósitos laminados. 2010.
Warren, A. Developments and challenges for aluminum--A boeing perspective. **Materials Forum**, v. 28, p. 24–31, 2004.
Xu, J.; An, Q.; Chen, M. An experimental investigation on cutting-induced damage when drilling high-strength T800S/250F carbon fiber-reinforced polymer. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, 2015.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.

A COMPARATIVE ANALISES OF TAPPING CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC AND ALUMINIUM 7075-T6 WITH DIFFERENT COMPENSATION SYSTEMS

Samuel Alves de Freitas, samuelengmec@gmail.com¹
Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufs.br¹
Thiago Castro Freitas, thiagocastrofreitas@hotmail.com¹
Wasley Amaral Coelho, wasleyamaral@hotmail.com¹
Lincoln Maia Teixeira, lincoln_ufs2009@hotmail.com¹

¹Universidade Federal de São João Del Rei, Praça Frei Orlando, 170, Centro, São João Del Rei, Minas Gerais, CEP 36307-352.

Abstract: The machining of composite, special laminated or particulate has been performed in the last years. The cut of this material is considered a challenge because despite these materials exhibit excellent physical and mechanical properties it's can be occur seriously damage when machining, for example, in the case of drilling, the delamination. However the application of the tapping process in composite is considered very new. The use of high speed steel special (HSSE), with or without coating has been considered an attractive solution to the machining this materials due the large application of this tools by the industrial process. On the present study it was investigated the cutting efforts using nitride of titanium coated (TiN) and uncoated tools in composite laminate made by carbon fiber reinforced plastic (FCRP). The results were compared with the tapping process in the aluminum alloy 7075-T6 on the same conditions. Furthermore the tests were conducted using two different axial compensation and speed levels. A full factorial experiment was conducted in the way to relate the cutting efforts perform assessing the characteristics of each factor and their respective levels. The results show different answers according with the coated tool and their results depending of the material machined. The axial compensation systems showed be significant, varying the cutting efforts according with the material used, coated tool and the cutting speed.

Keywords: Laminated composite, Carbon fiber, Tapping, Coated tools