

ESTUDO DA RUGOSIDADE E FORMAÇÃO DE REBARBAS NO FRESAMENTO DE STACKS DE FIBRA DE CARBONO E TITÂNIO

Tarik Hazem Ashmawi¹, Ed Cláudio Bordinassi²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *O trabalho realizado a seguir objetivou estudar a influenciados parâmetros de corte no processo de fresamento sobre a formação de rebarbas e rugosidade em uma estrutura híbrida ou stack composta de placas de fibra de carbono e titânio, visando-se obter novas informações acerca da seleção de tais parâmetros para um melhor acabamento da peça. Foram envolvidos três parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte), o tipo da ferramenta utilizada e região de fresamento(superfície de titânio ou fibra). Tais parâmetros foram variados através de um planejamento fatorial e realizou-se no total 32 ensaios de fresamento. As rebarbas e rugosidade resultantes foram medidas e realizados gráficos de Pareto, interações, entre outros; para analisar as duas placas juntas (titânio e fibra de carbono) e os materiais separados. Os resultados mostraram que a fibra de carbono possui maior rugosidade, enquanto o titânio, tamanho de rebarbas. Há forte ocorrência de delaminação na fibra de carbono e os parâmetros de corte para minimizar a rugosidade e rebarbas são ângulo de ferramenta de 45°, avanço de 0,028 mm/volta, profundidade de corte igual a 0,26 mm e a velocidade de corte igual a 150 m/min.*

Introdução

A indústria aeronáutica sempre possuiu enorme valor no mundo, já que intensificou a integração entre as civilizações. Ao longo do século XX e início do século XXI surgiu uma alta demanda por aeronaves com maior desempenho e menor peso, que é prevista para seguir até os próximos 20 anos (Wulfsberga et al, 2014). Os primeiros aviões eram construídos de tecido e madeira no início do século XX por meio dos trabalhos de Alberto Santos Dumont e irmãos Wilbur e Orville Wright. Em 1916, a empresa alemã Junkers fabricou um protótipo de metal que, apesar de nunca ser aprovado para decolagem, foi fundamental para a integração deste material na fuselagem do avião. A partir da década de 60, materiais poliméricos, com maior ênfase na fibra de carbono, começaram a ser introduzidos no desenvolvimento de aviões, devido à redução das massas das peças, mas atendendo às necessidades de voo de aeronaves (Rezende, 2000). Estes materiais passaram a ser utilizados em conjunto com os metais para melhorar suas propriedades.

Dois materiais que merecem destaque neste setor, graças às suas qualidades, são o titânio e a fibra de carbono. Nas aeronaves, compósitos reforçados com fibra de carbono ou *carbono fiber reinforced polymers* (CFRP) compõem boa parte de sua fuselagem, reduzindo drasticamente a massa. O principal benefício é a diminuição do consumo de combustível, porém mantendo a mesma capacidade para transporte de cargas (Denkena et al, 2008). O titânio é introduzido em regiões que requerem partes metálicas e resistência à temperatura, como, também, a fuselagem, e peças do motor. Por outro lado, ambos os materiais podem ser usados em conjunto para formar estruturas de alto desempenho de tal modo que compensem suas propriedades (Dahnel et al, 2016). Tais estruturas híbridas são denominadas de placas *stacks*: uma placa dupla composta de titânio e fibra de carbono unida. As vantagens vindas da combinação titânio e fibra de carbono são redução de corrosão galvânica, maior força específica e baixa formação de rebarbas (Denkena et al, 2008).

A usinagem e, especificamente, o fresamento destas placas, no entanto, são extremamente delicados, visto que seus componentes possuem uma série de problemas

relacionados a tal processo. O desbaste mecânico do metal titânio é conhecido por ser de difícil execução, com baixa duração das ferramentas, pois, apesar de requerer uma força de corte menor e baixo gasto de energia quando comparado a outros metais, as ferramentas de corte sofrem redução de sua vida útil. Tal fato é consequência do pequeno ângulo de saída da ferramenta e da superfície do titânio no momento do corte, proporcionando altas tensões de compressão sobre o inserto causando seu desgaste prematuro (Freeman, 1975; Smart e Trent, 1975, apud Trent, Wright, 2000). Ademais, deve-se considerar o calor gerado na zona de deformação durante a usinagem, devido ao atrito entre material e ferramenta e a alta taxa de deformação, os quais aumentam as forças de corte. Como consequência da má condução térmica do titânio, o calor não é dissipado para o resto do material e as forças de corte são concentradas sobre a região em desbaste, criando condições agressivas para o corte do material e desgaste da ferramenta.

A fibra de carbono, ao sofrer usinagem, é submetida a um processo chamado de delaminação (Klotz et al, 2014, Dahnell et al, 2016, Denkena et al, 2018). A delaminação é a separação das camadas da fibra, devido à ação combinada da força axial e torque da máquina durante a usinagem (Melentiev et al, 2016). Este fenômeno reduz, consideravelmente, a resistência a fadiga e qualidade do material com relação às tolerâncias dimensionais e geométricas (Melentiev et al, 2016). A delaminação que ocorre na região superior da peça é denominada de delaminação de descascamento (“*peel-up*” *delamination*) e, na inferior, delaminação de empurro (“*push-out*” *delamination*). Este problema, somado à complexidade da orientação das fibras na peça requer a elaboração de um sistema de fixação complexo para usinagem (Klotz et al, 2014).

O objetivo deste trabalho é entender o comportamento dos parâmetros de corte no fresamento de um *stack* titânio/fibra de carbono, variando os parâmetros de corte, como velocidade e profundidade de corte, e ferramenta. Serão analisadas as rebarbas geradas e rugosidade das superfícies.

Materiais e métodos

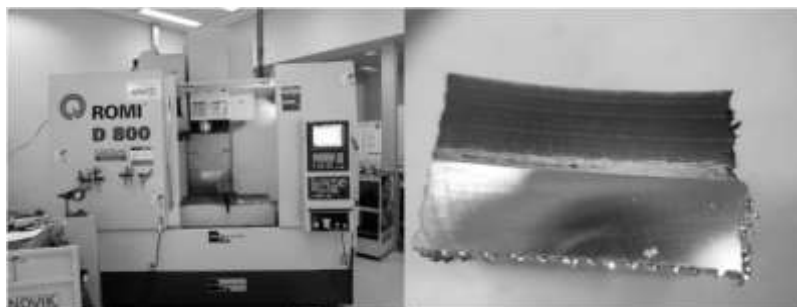
A estrutura híbrida utilizada neste trabalho é composta de uma placa de titânio de liga Ti-6Al-4V de dimensões 130 mm x 300 mm e espessura igual a 7,0 mm e CFRP laminado e de forma multidirecional constituído de fibras de grafite e matriz epóxi, com reforço em tecido de Carbono (8HS, *PlainWeave*), Vidro (7781/8HS, 116/*Plain*) e Aramida (Kevlar 285-4HS, 220-*Plain*) de dimensões 130 mm x 300 mm e espessura igual a 6,5 mm (Morine et al, 2016). As duas placas foram coladas através de um adesivo bi-componente elaborado pela fabricante estadunidense, Lord; denominado Fusor 380NS e 383NS, cujas bases são, respectivamente, resinas de epóxi modificadas e aminas.

A placa foi cortada em pequenos corpos de prova de larguras no intervalo de 25 a 30 mm e comprimento de 27 ± 1 mm. O equipamento utilizado foi uma serra de fita horizontal da marca Ronemak, modelo MR 210 G. A placa original foi dividida em quarenta e quatro corpos de prova.

O processo de fresamento ocorreu no centro de produtividade pertencente à fabricante de ferramentas para usinagem, Sandvik Coromant, São Paulo. O equipamento utilizado foi um centro de usinagem modelo D800 da marca Romi (Figura 1), apresentando um comando desenvolvido pela fabricante Siemens, modelo 828D. As pastilhas para fresamento foram R245-12 T3 E-ML 1040 e R390-11 T3 64M-PM 1130, ambas de metal duro com revestimento PVD (Ti,Al)N₂ e ângulos de corte iguais a, respectivamente, 45° e 90°. Os suportes foram R245-063Q22-12M e R390-020A20-11M, os quais continham 5 e 3 pastilhas respectivamente e ângulos de corte iguais a 45° e 90° respectivamente. O número de ensaios foi calculado utilizando-se um planejamento fatorial de 2⁵, sendo cinco o número de variáveis envolvidas. Tais variáveis são velocidade de corte (v_c)=150 m/min e 180 m/min, profundidade de corte (a_p)=0,25

mm e 0,5 mm, avanço (f)=0,02 mm/volta e 0,04 mm/volta, ângulo de posição da ferramenta 90° e 45° e região de surgimento das rebarbas devido à rotação da máquina: titânio ou fibra de carbono. O procedimento consistiu em um passe perpendicular às duas metades (titânio e carbono), de tal forma que frese ambos simultaneamente.

Figura 1 - Centro de usinagem utilizado nos ensaios de fresamento à esquerda e corpo de prova usinado à direita.



Os processos de medições de rugosidade e tamanho de rebarbas dos corpos de prova usinados foram realizados no laboratório de metrologia do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul. Os equipamentos utilizados foram um rugosímetro SJ 201 da fabricante Mitutoyo e projetor de perfil modelo PJ-300H da fabricante Mitutoyo para medir, respectivamente, rugosidade e rebarbas. As rugosidades foram medidas obedecendo-se à norma ABNT NBR 8404.

Durante as medições da rugosidade, para cada corpo de prova foram realizadas três medições e as médias. As medições ocorreram para as duas metades da placa independente da região onde formaram rebarbas.

O processo de preparação de micros foi realizado no Laboratório de Metalografia do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul; e teve como objetivo analisar as rebarbas formadas no titânio e fibra de carbono utilizando-se um microscópio óptico. A norma utilizada foi a ABNT NBR 13284. As quatro peças selecionadas foram às submetidas ao fresamento com ângulo de posição de 90°; uma dupla apresentando os maiores parâmetros de corte e outra dupla, os menores. Tais peças pertencem aos ensaios de números 17, 24,25 e 32 da coluna “Ensaio” na Tabela 1.

As quatro peças foram cortadas ao meio utilizando-se uma máquina *cut-off* da fabricante Arotec, modelo COR-40 e suas metades foram embutidas através de uma embutidora a quente da fabricante Struers, modelo Prestopress-3, cujo polímero de trabalho é a baquelite. A seguir realizou-se o lixamento dos corpos de prova com uma lixadeira mecânica e quatro lixas de 220, 320, 400 e 600 *mesh*. A seguir foram lixadas empregando-se uma politriz mecânica modelo Panambra DP 9, da fabricante Struers em conjunto com pasta de diamante com tamanho de partícula igual a 6µm e pano (Ø=200 mm) DP-Dur da fabricante Struers; e politriz mecânica modelo Panambra DP 9, da fabricante Struers em conjunto com alumina de tamanho com tamanho de partícula igual a 1 µm e pano (Ø=200 mm) DP-Dur da fabricante Struers.

A última etapa da elaboração de micros envolveu a imersão das quatro amostras em uma mistura contendo 95 mL de água destilada, 3 ml de ácido nítrico (HNO₃) e 2 ml de ácido fluorídrico (HF). Todas as peças foram analisadas em um microscópio óptico da fabricante Olympus, modelo BX60M com tubo óptico composto por três peças da Olympus, modelos UC30, U-CMAD-2 e U-TVO.5X.

A análise visual de imagens obtidas por microscópio eletrônico de varredura foi realizada no Laboratório de Reciclagem, Tratamentos de Resíduos e Extração na Universidade de São Paulo. O aparelho é da fabricante Phenom, modelo Pro X. As quatro peças selecionadas foram

submetidas ao fresamento com ângulo de 45°; uma dupla apresentando os maiores parâmetros de corte e outra dupla, os menores. Tais peças pertencem aos ensaios de números 1, 8, 9 e 16. A peça 1 foi novamente enviada para análise na empresa TESCAN e utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura modelo Vega3 da fabricante TESCAN.

Resultados e discussões

Os resultados originados das medições de rugosidade e tamanho de rebarbas para todos trinta e dois ensaios estão apresentados na Tabela 1.

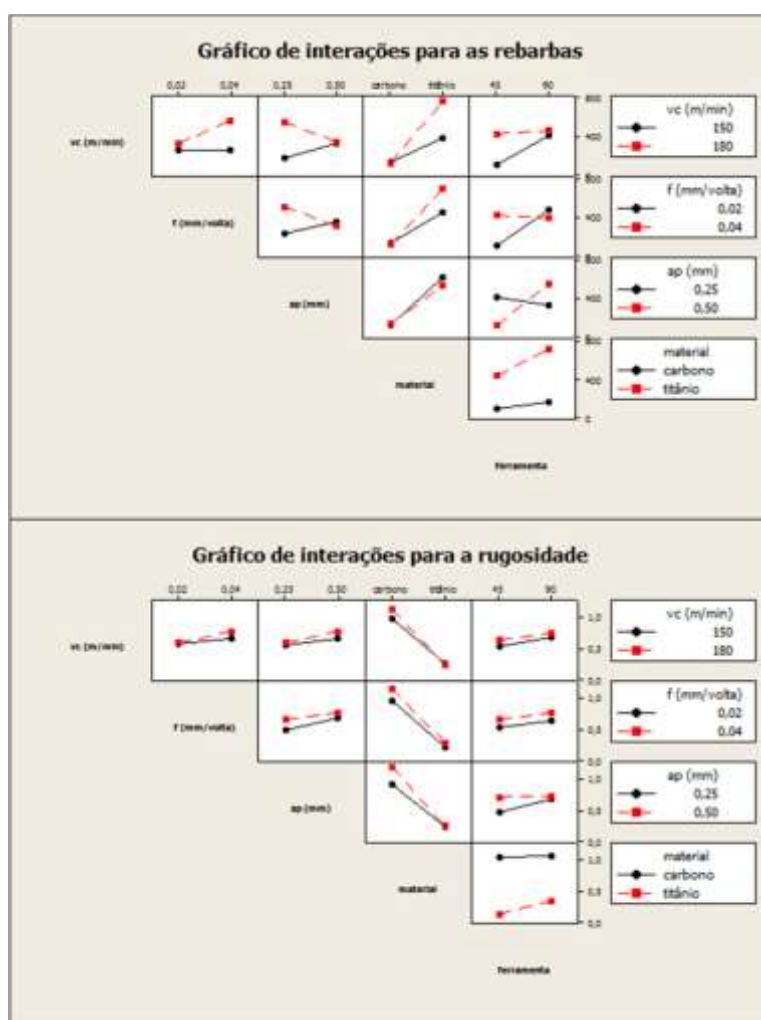
Tabela 1 - Resultados obtidos.

Ensaio	vc (m/min)	f (mm/volta)	ap (mm)	material	ferramenta	rugosidade titânio (μm)	rugosidade carbono (μm)	rugosidade média (μm)	rebarba (μm)
1	150	0,02	0,25	carbono	45	0,1183	0,3800	0,5300	38,00
2	180	0,02	0,25	carbono	45	0,1283	0,5425	0,5725	80,00
3	150	0,04	0,25	carbono	45	0,1017	0,8333	0,8500	85,00
4	180	0,04	0,25	carbono	45	0,0917	0,4225	1,2633	127,00
5	150	0,02	0,5	carbono	45	0,1133	1,2267	1,1417	182,50
6	180	0,02	0,5	carbono	45	0,1200	1,2500	1,4490	95,00
7	150	0,04	0,5	carbono	45	0,1750	1,2267	1,2800	100,00
8	180	0,04	0,5	carbono	45	0,1367	1,1740	1,2300	95,00
9	150	0,02	0,25	titânio	45	0,1050	1,4100	0,1117	95,00
10	180	0,02	0,25	titânio	45	0,1700	0,8750	0,1492	66,50
11	150	0,04	0,25	titânio	45	0,1100	1,1083	0,1058	120,00
12	180	0,04	0,25	titânio	45	0,1567	1,3450	0,1242	2680,00
13	150	0,02	0,5	titânio	45	0,1250	1,0567	0,1192	140,00
14	180	0,02	0,5	titânio	45	0,1283	1,5817	0,1242	167,50
15	150	0,04	0,5	titânio	45	0,1750	1,3333	0,1750	85,00
16	180	0,04	0,5	titânio	45	0,2583	0,4625	0,1975	135,00
17	150	0,02	0,25	carbono	90	0,3683	1,5700	1,0875	167,00
18	180	0,02	0,25	carbono	90	0,4433	1,0717	0,8913	100,00
19	150	0,04	0,25	carbono	90	0,5800	1,1133	1,0025	205,00
20	180	0,04	0,25	carbono	90	0,3933	1,1950	1,1000	160,00
21	150	0,02	0,5	carbono	90	0,2050	0,9900	0,9517	200,00
22	180	0,02	0,5	carbono	90	0,2533	0,9467	1,0213	210,00
23	150	0,04	0,5	carbono	90	0,4383	0,9183	0,9643	108,00
24	180	0,04	0,5	carbono	90	0,3383	1,0950	1,5267	130,00
25	150	0,02	0,25	titânio	90	0,3100	1,1525	0,3392	395,00
26	180	0,02	0,25	titânio	90	0,2317	0,8100	0,2670	922,50
27	150	0,04	0,25	titânio	90	0,4250	1,1433	0,4363	378,00
28	180	0,04	0,25	titânio	90	0,4217	1,0050	0,4075	325,00
29	150	0,02	0,5	titânio	90	0,3500	0,9133	0,2775	864,00
30	180	0,02	0,5	titânio	90	0,3367	1,3240	0,2950	969,00
31	150	0,04	0,5	titânio	90	0,3667	1,4300	0,4025	972,50
32	180	0,04	0,5	titânio	90	0,4250	1,6517	0,3817	935,00

Os valores das rugosidades foram medidos para os dois materiais dentro de cada ensaio e foi elaborada uma média para os valores de rugosidade nos dois materiais para ensaios que apresentavam os mesmos parâmetros de corte, enquanto as rebarbas foram medidas somente para a região na qual surgiram.

Primeiramente foram elaborados gráficos de Pareto para as rebarbas e rugosidade dos dois materiais juntos para avaliar as influências estatísticas de cada parâmetro. O material foi o fator que provocou a maior influência sobre a rugosidade e tamanho das rebarbas, sendo, na primeira, este efeito bem distinto dos demais. Tal fato é claramente justificável devido às enormes diferenças existentes entre os dois. Ademais, no caso da rugosidade, os efeitos da profundidade de corte, material e profundidade combinados e avanço apresentaram uma leve significância estatística.

Figura 2 - Gráficos de interações dos objetos de estudo para os dois materiais. À esquerda há os gráficos da rugosidade, Figura 2.a; e direita, rebarbas, Figura 2.b.



A Figura 2 representa gráficos de interações entre os efeitos dos parâmetros de corte, ferramenta e material sobre a rugosidade (Figura 2.a) e rebarbas (Figura 2.b). Esta indica que o tamanho médio das rebarbas do titânio é muito superior ao das do carbono (578,125 μm em comparação com 130,156 μm, cerca de 4,5 vezes menor), enquanto o oposto ocorreu com a rugosidade: para o carbono observou-se um valor médio de 1,05 μm, enquanto no titânio, 0,24 μm (em torno de 4,3 vezes menor). Uma possível explicação para estes fenômenos é que a fibra

de carbono, por apresentar resistência ao cisalhamento nula, sofrer usinagem com enorme facilidade, tornando seu cavaco e rebarbas extremamente pequenas e quebradiças; enquanto sua rugosidade é alta pelo fato de o material ser fibroso e não uniforme. Ademais, durante a usinagem, existe a possibilidade de haver a propagação de trincas para as fibras devido à fragilidade do material. O titânio, por outro lado, é um metal que possui alta taxa de tensão-deformação, permitindo um tamanho maior para seu cavaco, e, portanto, rebarbas e que a ferramenta propicie um melhor acabamento superficial. Os valores das rugosidades e tamanhos de rebarbas para a fibra de carbono e titânio são fortemente dependentes dos parâmetros de máquinas e impossibilitam generalização.

Os gráficos E, F e G da Figura 2 estão de acordo com os resultados obtidos por Kumar et al (2017), apud Thepsonthi et al, 2014; e Kumar et al (2017), apud Thepsonthi et al, 2012; os quais afirmam que maiores valores de avanço propiciam melhores acabamentos na superfície da peça para micro fresamento.

Vale destacar a ocorrência de um efeito cruzado no gráfico I da Figura 2: para uma profundidade igual a 0,5 mm, o valor médio das rebarbas aumenta quando se altera o ângulo da máquina, entretanto o efeito contrário ocorre sobre as rebarbas para uma profundidade igual 0,25 mm. Os efeitos combinados da profundidade e ferramenta, no entanto, não apresentam influência estatística sobre o tamanho das rebarbas devido aos gráficos de Pareto elaborados, porém podem representar uma tendência do comportamento dos materiais.

Foram realizados também gráficos para os materiais, titânio e fibra de carbono, separadamente.

Foram elaborados gráficos de Pareto para as rebarbas e rugosidade da fibra de carbono para avaliar as influências estatísticas de cada parâmetro. No caso da rugosidade, nenhum dos parâmetros de corte estudados apresentou influência estatística, o qual não condiz com estudos de Nor Khairusshima et al (2017), os quais afirmam que velocidade de corte e avanço são, respectivamente, inversa e diretamente proporcionais à rugosidade superficial. Analisando-se as rebarbas, a ferramenta e os efeitos combinados da profundidade e avanço são fatores determinantes.

A Figura 3 contém gráficos da interação entre a profundidade de corte e avanço, e efeitos especiais da ferramenta sobre as rebarbas da fibra de carbono. Pode-se afirmar que o ângulo de ferramenta igual a 45° gerou rebarbas muito menores do que 90° e há a presença de um forte efeito cruzado entre a profundidade e avanço, isto é, os tamanhos das rebarbas serão menores quando os dois parâmetros apresentaram os piores ou melhores valores e maiores, quando um apresentar o melhor valor e outro, pior. Ademais, percebe-se, no gráfico de interações da Figura 3, que o tamanho das rebarbas varia de forma mais intensa para um avanço de 0,04 mm/volta. Por serem extremamente pequenas (o valor máximo obtido neste estudo foi igual a 210 µm).

No caso do titânio, seus gráficos de Pareto sugeriram que os parâmetros de corte avaliados não apresentaram diferença estatística sobre o tamanho das rebarbas e sim sobre a rugosidade. O ângulo de ferramenta demonstrou de forma muito superior a maior influência sobre a rugosidade, seguida do avanço e efeitos combinados da ferramenta e avanço. Tais observações estão próximas dos resultados obtidos por Bandapalli et al (2017), os quais afirmam que o avanço é o fator mais influente seguido da profundidade, porém para micro fresamento.

A Figura 4 apresenta gráficos da interação entre profundidade de corte e avanço e efeitos especiais para profundidade e avanço sobre a rugosidade do titânio. De forma semelhante às rebarbas da fibra de carbono, percebe-se através do gráfico dos efeitos especiais da Figura 4 que o ângulo da ferramenta é diretamente proporcional ao acabamento do titânio e fator determinante em seus valores. O avanço, apesar de também diretamente proporcional, possui influência muito inferior à ferramenta. O gráfico de interações da Figura 4 propõe que, para um ângulo de ferramenta igual a 45°, a variação na rugosidade é quase nula entre valores de avanço iguais a 0,02 e 0,04 mm/volta.

Figura 3 – Gráficos da interação entre avanço e profundidade de corte à direita e dos efeitos especiais da ferramenta à esquerda sobre as rebarbas da fibra de carbono.

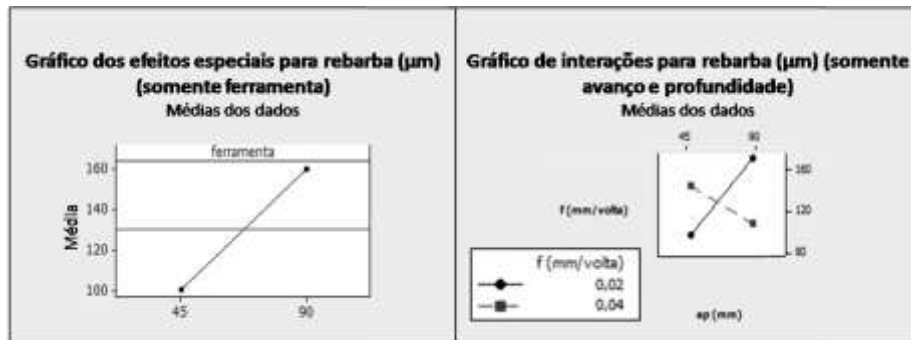


Figura 4 – Gráficos de interação à esquerda entre avanço e profundidade de corte e dos efeitos especiais à direita do avanço e profundidade de corte sobre a rugosidade do titânio.

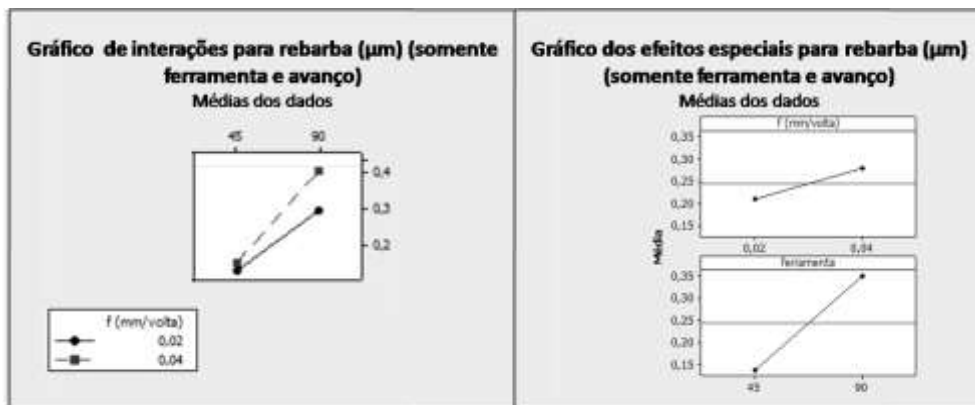
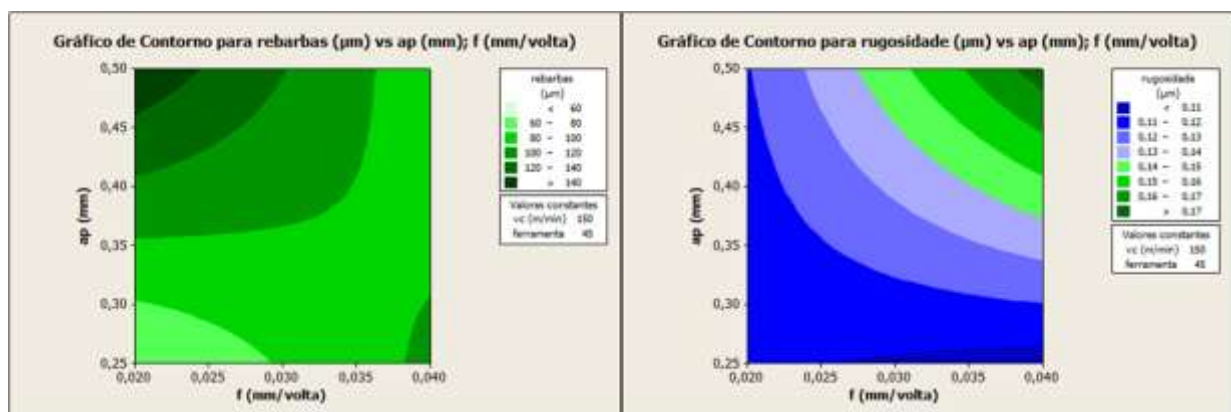


Figura 5 – Gráficos de contorno para os tamanhos das rebarbas (fibra de carbono) à esquerda e rugosidade (titânio) à direita em função do avanço e profundidade, utilizando-se a ferramenta de 45° e velocidade de corte igual a 150 m/min.



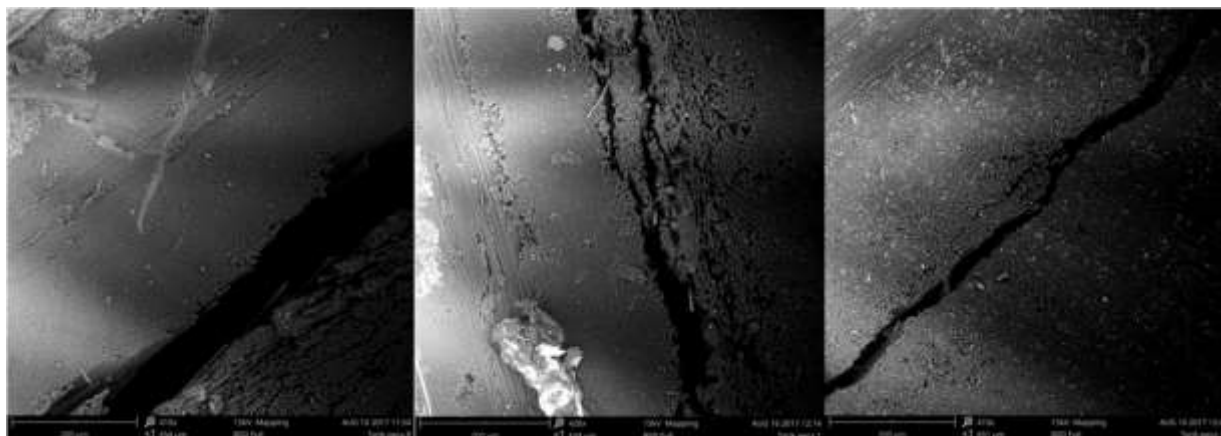
Na Figura 5 são apresentados gráficos de contorno dos dois elementos de análise que demonstraram sucesso em seu estudo para cada material, considerando-se a análise estatística. Para uma velocidade de corte igual a 180 m/min (gráfico não exibido), percebeu-se que não há todos os parâmetros em comum para as rebarbas da fibra de carbono e rugosidade do titânio, de tal forma que ambas sejam minimizadas, dificultando a usinagem do *stack*, pois os dois materiais são fresados em conjunto. Considerando-se a velocidade de corte de 150 m/min (**Figura 5**), esta

demanda é atingida. Portanto, os parâmetros ideais são, visando-se minimizar o tamanho médio das rebarbas e a rugosidade, manter a velocidade de corte igual a 150 m/min e usar ferramenta de 45°, empregar o avanço no intervalo [0,026 - 0,028] mm/volta e profundidade máxima de 0,26 mm.

Nas análises através de microscópio eletrônico de varredura, foi observada a presença de delaminação nos corpos de prova dos ensaios de números 1, 8 e 16 da Tabela 1. A Figura 6 apresenta os resultados pertencentes às três primeiras. As peças nas quais observaram delaminação foram, em sua maioria, usinadas empregando-se velocidade de corte igual a 180 m/min, contradizendo Nor Khairusshima et al (2017): a taxa de delaminação é inversamente proporcional à velocidade de corte. Todavia, vale destacar a delaminação depende fortemente do ângulo entre orientação da fibra e sentido do avanço (Voss et al, 2017) e, como dito anteriormente, todas as peças não foram avaliadas.

O fato de haver discordâncias entre a usinagem do trabalho presente e de outros artigos pode ser devido à amostra envolvendo as placas de titânio e fibra de carbono empregada, a qual pertenceu a uma matriz extremamente diferente da utilizada em outros estudos. Ademais, há a possibilidade de o adesivo ter afetado os ensaios, porém esta afirmação requer investigações mais detalhadas.

Figura 6 - Ocorrência de delaminação nas peças 1, 8 e 16 (esquerda à direita). Imagens obtidas através de microscópio eletrônico de varredura.



A Figura 7 apresenta as rebarbas resultantes da usinagem no titânio (imagem à esquerda e “metade” esquerda da imagem no centro) e fibra de carbono. As rebarbas do titânio são típicas de metal: aparência acidentada e “rochosa”, a qual pode provocar possíveis ferimentos ao manusear a peça. Em contrapartida, as rebarbas da fibra de carbono são cortes e rupturas nos fios que a compõem, semelhantes a um tecido rasgado.

Na Figura 8, há as rebarbas do titânio obtidas através de análise metalográfica. As peças 24 e 32 foram usinadas empregando os mesmos parâmetros com a exceção do material onde concentraram as rebarbas, enquanto 17 e 27 diferem no avanço e material. O titânio apresentou rebarbas muito maiores nos corpos de prova que sofreram fresamento com enfoque no carbono, reforçando o que fora concluído no gráfico de Pareto elaborados para os dois materiais.

Figura 7 - Rebarbas resultados dos ensaios de usinagem. À esquerda: titânio (Figura 7.a), centro: titânio, adesivo e fibra de carbono (Figura 7.b); e esquerda: fibra de carbono (Figura 7.c).

7.c). Legenda: Ti – titânio, Fb C – fibra de carbono e Ad – adesivo. Imagens obtidas através de microscópio óptico de varredura.

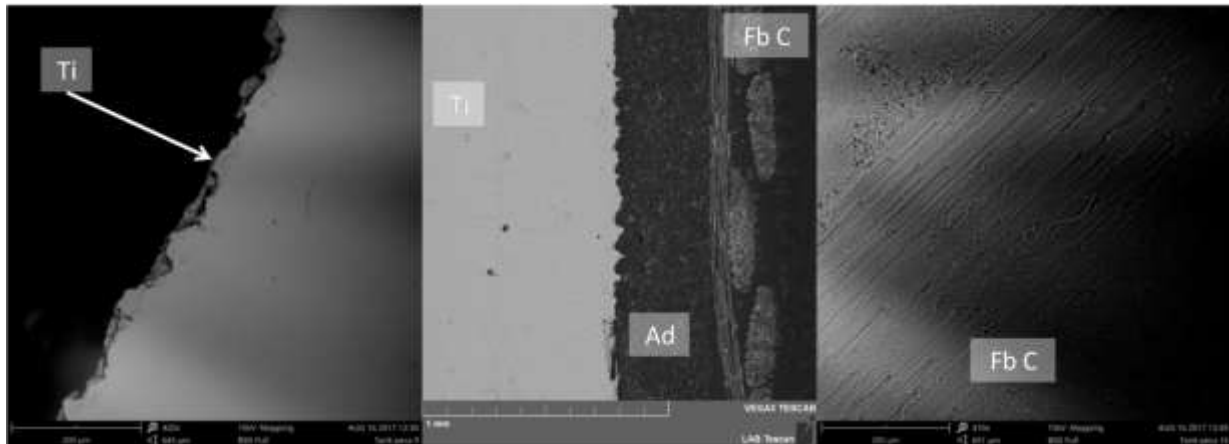


Figura 8 - Rebarbas das peças 17 e 24 (superiores) e 27 e 32 (inferiores). Imagens obtidas através de microscópio óptico.



Conclusões

As análises dos resultados mostraram que, com relação ao carbono, as rugosidades encontradas ficaram na faixa de 0,38 e 1,6517 μm . Já as rebarbas, 38,0 e 210 μm . Para a obtenção da menor rugosidade e menor rebarba foi utilizado $v_c=150$ m/min, $f=0,02$ mm/volta, $a_p=0,25$, ferramenta de 45° e o lado do carbono como região de concentração de rebarbas. A rugosidade não apresentou parâmetros com influência significativa, enquanto a formação de rebarbas teve a ferramenta e os efeitos combinados da profundidade e avanço.

Por outro lado, as rugosidades obtidas para o titânio estiveram na faixa de 0,0917 μm e 0,5800 μm . No caso das rebarbas, 66,5 e 2680 μm . Para a obtenção da menor rugosidade foi utilizado $v_c=180$ m/min, $f=0,04$ mm/volta, $a_p=0,25$, ferramenta de 45° e fresamento no carbono; e menor rebarba, $v_c=180$ m/min, $f=0,02$ mm/volta, $a_p=0,25$, ferramenta de 45° e fresamento no carbono.

Visando-se reduzir o tamanho médio das rebarbas no titânio, deve-se usar o *stack* de tal forma que as rebarbas sejam focadas na fibra de carbono. Ademais, para minimizar a rugosidade do titânio e rebarbas da fibra de carbono, recomenda-se empregar um ângulo de ferramenta de 45°, avanço aproximado de 0,028 mm/volta, profundidade de corte máxima igual a 0,26 mm e a velocidade de corte igual a 150 m/min.

A taxa de delaminação é inversamente proporcional à velocidade de corte, entretanto, a maioria das peças nas quais foi observada haviam sido fresadas com as velocidades de corte máximas. A falta de orçamento e tempo afetou a análise microscópica no que se refere à verificação de delaminação em todos os ensaios.

Referências

- Bandapalli, C.; Sutaria, B. M.; Bhatt, D. V.; Singh, K. K. (2017). Experimental Investigation and Estimation of Surface Roughness using ANN, GMDH & MRA models in High Speed Micro End Milling of Titanium Alloy (Grade-5). *Materials Today: Proceedings*, 4, 1019–1028.
- Dahnel, A.N.; Ascroft, H. Barnes, S. (2016). The effect of varying cutting speeds on tool wear during conventional and Ultrasonic Assisted Drilling (UAD) of Carbon Fibre Composite (CFC) and titanium alloy stacks. *Procedia CIRP*, 46, 420 – 423.
- Denkena, B.; Boehnke, D; Dege, J. G. (2008). Helical milling of CFRP–titanium layer compounds. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1, 64–69.
- <http://www.brasil.discovery.uol.com.br/tecnologia/imagens/feitos-que-marcaram-a-historia-dos-avioes/> (Acessado dia: 11/03/2017).
- Klotz, S.; Zanger, F.; Schulze, V. (2014). Influence of clamping systems during milling of carbon fiber reinforced composites. *Procedia CIRP*, 24, 38 – 43.
- Kumar, P.; Kumar, M.; Bajpai, V.; Singh, N. K. (2017). Recent advances in characterization, modeling and control of burr formation in micro-milling. *Manufacturing Letters*, 13, 1-5.
- Melentiev, R.; Priarone, P. C.; Robiglio, M.; Settineri, L. (2016). Effects of tool geometry and process parameters on delamination in CFRP drilling: An overview. *Procedia CIRP*, 45, 31 – 34.
- Morine, MR. *Usinagem em Placa Mista de Fibra de Carbono e Titânio com Brocas de Policristalino de Diamante (PCD)* [trabalho de conclusão de curso]. São Caetano do Sul: CEUN/EEM; 2016.
- Nor Khairusshima, M. K.; Nurul Agella, A. K.; Sharifah, I. S. S. (2017). Optimization of Milling Carbon Fibre Reinforced Plastic using RSM. *Procedia Engineering*, 184, 518 – 528.
- Rezende, M. C. O. (2000). Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 10, nº 2, E4 – E10.
- Thepsonthi, T.; Özel, T. (2012). Multi-objective process optimization for micro-end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63, 903-914.
- Thepsonthi, T.; Özel, T. (2014). An integrated toolpath and process parameter optimization for high-performance micro-milling process of Ti-6Al-4V titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75, 57-75.
- Trent, E. M. e Wright, P. K. (2000). *Metal Cutting*. 4th edition. Woburn, Butterworth-Heinemann.
- Voss, R.; Seeholzer, L.; Kuster, F.; Weneger, K. (2017). Influence of fibre orientation, tool geometry and process parameters on surface quality in milling of CFRP. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 18, 75 – 91.
- Wulfsberga, J.; Herrmannb, A.; Ziegmannc, G.; Lonsdorferb, G.; Stöbld, N.; Fette, M. (2014). Combination of carbon fibre sheet moulding compound and prepreg compression moulding in aerospace industry. *Procedia Engineering*, 81, 1601 – 1607.