

ESTUDO EXPERIMENTAL DO FRESAMENTO DA LIGA Ti-6Al-4V TRATADA TERMICAMENTE

Matheus Felipe Ribeiro Santos, matheus.santos.5@aluno.cefet-rj.br¹

Fábio de Oliveira Campos, fabio.campos@cefet-rj.br¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)

Resumo: O uso do titânio e suas ligas, em especial a Ti-6Al-4V, se dá amplamente nas indústrias aeronáutica, aeroespacial e biomédica devido à sua baixa massa específica e alta resistência à corrosão, características valorizadas especialmente na fabricação de implantes médicos e dentários. O uso da liga com alumínio e vanádio ocorre por conta de sua maior resistência mecânica em relação ao titânio comercialmente puro (CP-Ti), porém mantendo a biocompatibilidade elevada o suficiente para a utilização. O fresamento e o microfresamento são processos com importantes aplicações, especialmente na área biomédica. É sabido que na microescala, há uma maior tendência da ocorrência do ploughing durante o corte, dependendo dos parâmetros utilizados. Esse fenômeno também pode ocorrer no fresamento na escala macro caso seja utilizado um avanço por dente próximo do valor do raio da aresta de corte. No microfresamento, a microestrutura possui papel fundamental no resultado da usinagem, pois os parâmetros de corte são da mesma escala dos grãos, o que tem sido já bastante estudado pela literatura. Este artigo tem como objetivo analisar a influência da microestrutura nas forças de corte no fresamento em escala macro da liga Ti-6Al-4V na ocorrência do ploughing, ou seja, utilizando parâmetros de corte com valores próximos ao raio da aresta da ferramenta. As diferentes microestruturas são obtidas através de tratamentos térmicos específicos. Considerando os parâmetros usados neste trabalho, foi concluído que os tratamentos térmicos afetam diretamente as forças de corte no fresamento, porém não foi detectada a ocorrência de ploughing.

Palavras-chave: Fresamento, Microfresamento, Ti-6Al-4V, Microestrutura, Forças de corte

1. INTRODUÇÃO

O titânio é considerado o quarto metal estrutural mais abundante do planeta Terra, sendo superado apenas pelo alumínio, ferro e magnésio (Welsch, 1994). Sua concentração na crosta terrestre se encontra por volta de 0.6%, sendo frequentemente encontrado na natureza nas formas de rutilo, anatásio e bruquita, sendo estas formas diferentes do mesmo óxido (TiO₂), como também na forma de ilmenita (FeTiO₂). De 2000 até 2008, foi apresentada uma taxa média de crescimento anual de 8% na produção do material no Brasil (Amorim and Almeida, 2009).

O uso do titânio e suas ligas (em especial a Ti-6Al-4V) se dá amplamente nas indústrias aeronáutica, aeroespacial e biomédica devido à sua baixa massa específica e alta resistência à corrosão (Dehghan *et al.*, 2021), características valorizadas especialmente na manufatura de implantes médicos e dentários. O uso da liga com alumínio e vanádio ocorre por conta de sua maior resistência mecânica em relação ao titânio comercialmente puro (CP-Ti), sem alteração em propriedades importantes para sua aplicação, como, por exemplo, sua biocompatibilidade.

Devido à usinabilidade difícil e pouco vantajosa da liga de titânio Ti-6Al-4V, outras ligas de titânio têm sido desenvolvidas, visando melhor usinabilidade sem prejudicar a resistência mecânica do material (Abbasi *et al.*, 2016). Ainda assim, a liga Ti-6Al-4V continua sendo largamente utilizada em aplicações odontológicas, sobretudo implantes dentários.

O fresamento e o microfresamento são processos de fabricação muito utilizados na fabricação de implantes. Alguns estudos que fizeram experimentos de microfresamento em titânio fabricado por processos de manufatura aditiva, relataram possíveis influências da microestrutura nos resultados, levando à forças de corte maiores para materiais com dureza menor. De acordo com Campos *et al.* (2020), após realizar um experimento de microusinagem em duas amostras da liga titânio Ti-6Al-4V, uma comum e outra produzida a partir do processo de manufatura aditiva fusão seletiva a laser (SLM), foi possível observar que o desgaste da ferramenta de corte não havia ocorrido da mesma forma em ambos os espécimes, o que de fato era esperado. No entanto, os resultados do estudo concluíram que as forças de corte durante o processo havia sido menores na amostra produzida a partir de SLM, que apesar de possuir maior resistência e dureza do que a amostra comercial, apresentou melhor usinabilidade, contrariando o resultado esperado.

Tal conclusão vai de encontro aos resultados demonstrados por Bonaiti *et al.* ao comparar as forças de corte do

microfresamento, juntamente com a qualidade da superfície e formação de rebarba, de amostras de Ti-6Al-4V comercial em relação às produzidas através de outro processo de manufatura aditiva denominado Laser Engineered Net Shaping (LENS) a fim de contrapor suas usinabilidades. As forças de corte encontradas no processo realizado com o titânio comercial foram maiores do que as das amostras LENS, apesar dos valores relativos às durezas destas serem maiores.

Um dos motivos para esse fenômeno ocorrer pode ser encontrado ao se analisar as microestruturas dos materiais em questão. A amostra de Ti-6Al-4V comercial apresenta grãos α equiaxiais com uma fase *alpha-beta* intergranular em sua microestrutura, sendo possível observar alguns grãos alongados que podem criar resistência ao corte durante o processo de microusinagem. Já na amostra produzida por SLM, por exemplo, é possível observar uma microestrutura α' martensítica acicular, resultado do rápido resfriamento que ocorre no processo de SLM após a fusão do pó metálico.

Nos processos de microfresamento, a ocorrência do fenômeno de *ploughing*, que é quando o material não é cortado por cisalhamento, mas apenas deformado plasticamente, está ligada ao efeito escala que aparece nos processos em microescala porque o avanço por dente utilizado é próximo ao valor do raio da aresta de corte, fazendo com que não se possa mais considerar a ferramenta como totalmente afiada (Araújo *et al.*, 2020).

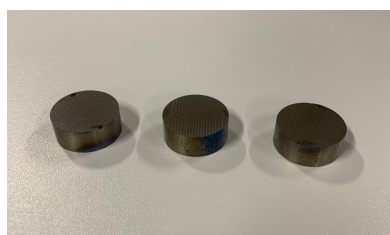
Assim, o presente trabalho tem como objetivo analisar a influência da microestrutura na usinagem por fresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V utilizando parâmetros de corte próximos ao valor do raio da aresta de corte, verificando a ocorrência de *ploughing* para simular condições próximas do microfresamento. A análise da usinagem é feita através das forças de corte, da superfície gerada no canal usinado e da formação de rebarba.

2. METODOLOGIA

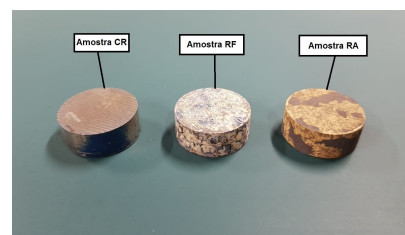
O material utilizado para os experimentos de fresamento foi a liga de titânio Ti-6Al-4V ELI, grau 23, sendo que foi comprado um tarugo de 25,4 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento. Desta, foram cortadas por eletroerosão a fio três amostras de 10 mm de comprimento, as quais foram de fato usadas no experimento. O corte por eletroerosão foi escolhido por ser uma operação que fornece boa precisão, uma superfície nivelada e gera um baixo aporte de calor, influenciando pouco a superfície cortada.

Após o corte, duas das amostras foram submetidas a dois processos de tratamentos térmicos diferentes e a terceira se manteve como recebida para comparação. Os tratamentos térmicos foram definidos de acordo com o estudo de Cortez and Reis (2007), que usou amostras de mesmo tamanho, e são especificados abaixo:

- Amostra CR (como recebida) - esta amostra não foi submetida a nenhum procedimento de alteração de propriedades, se mantendo com as propriedades originais;
- Amostra RA (resfriada em água) - esta amostra foi submetida a aquecimento em forno a 1050 °C por 1 hora e resfriada em água. Neste procedimento, a amostra foi agitada no líquido durante alguns minutos até que a temperatura ficasse uniforme. A microestrutura esperada de ser formada no material é martensita lamelar;
- Amostra RF (resfriamento no forno) - esta amostra foi submetida a aquecimento em forno a 1050 °C por 30 minutos e resfriada dentro do forno a 6 °C/min. Neste procedimento, após os 30 minutos, o forno foi desligado e a peça mantida até sua uniformização à temperatura ambiente. A microestrutura esperada é a formação Widmanstätten. A Tab. 1 resume os dados dos tratamentos térmicos e a Fig. 1 apresenta as amostras antes e após os tratamentos térmicos.



(a) Amostras de Ti-6Al-4V após tratamento térmico.



(b) Amostras de Ti-6Al-4V não tratadas.

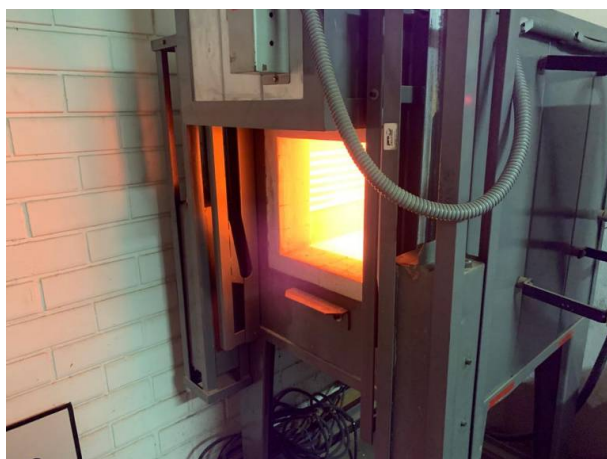
Figura 1: Amostras usadas no trabalho.

Tabela 1: Relação entre condições de tratamento térmico e estrutura esperada.

Condições de tratamento térmico	Estrutura esperada
Aquecimento a 1050 °C por 30 min; Resfriamento de 6 °C/min. ao forno.	Widmanstätten
Aquecimento a 1050 °C por 1h; Resfriamento em água.	Martensita (Lamelar)

Para a realização dos tratamentos térmicos, foi utilizado um forno elétrico da InforGel modelo G.T.I., conforme mostrado na Fig. 2(a), localizado no Laboratório de Metalografia do CEFET/RJ - campus Nova Iguaçu. Segundo o manual

de operação do equipamento, o forno pode trabalhar com temperaturas de até 1100°C, dispondo de ligação trifásica. Este forno apresenta duas limitações importantes em relação aos tratamentos propostos no trabalho: ele não gera vácuo e também não é possível programar a taxa de resfriamento da sua câmara. Como é sabido, as ligas de titânio com alumínio e vanádio, quando trabalhadas a altas temperaturas em atmosferas não protegidas, formam uma camada em sua superfície de óxido de titânio (TiO_2). De acordo com Donachie (2000), para os tempos e temperaturas trabalhadas neste estudo, a espessura dessa camada seria de cerca de 0,3 mm, que poderia ser retirada de forma química ou mecânica. Como antes dos experimentos de fresamento, é feita a planificação da superfície, essa camada será retirada neste procedimento. Em relação à taxa de resfriamento no forno de 6 °C/min., a temperatura foi monitorada durante o resfriamento e foi notada uma taxa um pouco mais lenta de cerca de 4 °C/min. No resfriamento à água, uma camada de oxidação bastante frágil saiu já durante a agitação da peça no líquido.



(a) Forno elétrico InforGel GTI.



(b) Fresadora usada nos experimentos.

Figura 2: Equipamentos usados no estudo.

Os experimentos de fresamento foram feitos em uma fresadora feramenteira semiautomática modelo Diplomat FVF 2000, de fabricação pela DEB'MAQ, representada na Fig. 2b). Essa fresadora é dotada de uma mesa com dimensões de 230 mm x 1244 mm, com deslocamento nos eixos x , y e z , sendo o avanço em y automático e configurável por meio de um painel digital da empresa Heidenhain. Além disso, seu motor principal possui potência de 2,23 kW (3 HP) e o eixo principal trabalha com rotação de 78 a 4500 rpm.

A ferramenta de corte usada foi uma fresa de 3 mm de diâmetro inteira de metal duro com revestimento de TiCrSiN fabricada pela Sandvik. Por meio das imagens das Fig. 2a e 2b, obtidas através do microscópio digital USB Novacom, foi possível obter o raio de aresta de corte através do programa de medição ImageJ. O raio da aresta foi medido na localização apontada pela Fig. 2b e seu valor foi de 50 μm . Por se tratar de um experimento de fresamento em cheio, a espessura de corte foi o mesmo do diâmetro da ferramenta, que possui 3 mm.

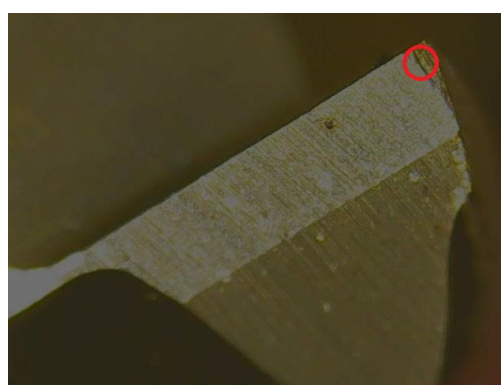
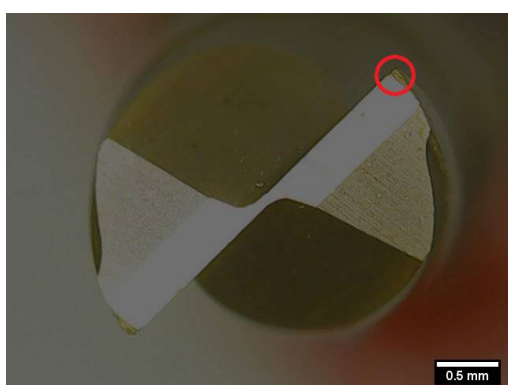


Figura 3: Análise da ferramenta de corte nova.

Durante os experimentos de fresamento, as forças de corte foram adquiridas usando o dinamômetro 9257BA da Kistler, conectado a um amplificador de sinal também da Kistler (5233A) e uma placa de aquisição da National Instruments (NI USB 6221). O programa para aquisição de sinais utilizados foi o Labview e para tratamento e análise dos sinais de força, foi usado o Matlab. A Fig. 4 mostra as direções de aquisição do dinamômetro e a direção de avanço da ferramenta nos procedimentos. Os sinais de força foram analisados no campo da frequência através da aplicação de uma FFT (*Fast Fourier Transform*) para verificar a necessidade de filtragem. Os sinais de força foram analisados para ratificação do formato de acordo com os parâmetros de corte e a força resultante foi computada para comparar as amostras.

Como o objetivo do trabalho é analisar a influência da microestrutura do titânio grau 23 na usinagem por fresamento, mas também verificar a possível ocorrência de *ploughing* no fresamento em escala convencional, para o planejamento



Figura 4: Direções de aquisição dos sinais de força do dinamômetro.

de experimentos, foi definido apenas um fator com quatro níveis. O avanço por dente foi especificado como parâmetro variável, pois seu valor é a principal causa da ocorrência do *ploughing*: na teoria do microfresamento, quando o avanço está abaixo da espessura mínima de corte, há a ocorrência predominante deste fenômeno; e quando o avanço está acima da espessura mínima de corte, o corte por cisalhamento passa a predominar, que é o caso geral do fresamento na macro-escala. A espessura mínima de corte pode ser estimada, por exemplo, através do raio da aresta de corte da ferramenta. Dessa forma, foram especificados os níveis de avanço de 0,010, 0,025, 0,040 e 0,055 mm/dente. Os experimentos foram realizados em ordem aleatória, porém na mesma ordem para cada amostra. A profundidade de corte foi mantida fixa em 0,2 mm, mantendo, assim, um volume de material retirado compatível com processos em escala micro. Por falta de recursos, não foram feitas réplicas. Os outros parâmetros foram mantidos fixos: rotação de 4000 rpm, velocidade de corte de 37,7 m/min., corte em cheio e sem utilização de fluido refrigerante, como resumido na Tab. 2. A Tab. 3 mostra a ordem dos experimentos realizados.

Tabela 2: Parâmetros de corte e condição de usinagem dos experimentos.

Parâmetro de corte/Condição	Especificações
Ferramenta de corte	3 mm
Revestimento	TiCrSiN
Máquina-ferramenta	Fresadora Diplomat FVF 2000
Avanço por dente (mm/dente)	0,010; 0,025; 0,040; 0,055
Profundidade de corte	0,2 mm
Espessura de corte	3 mm (corte em cheio)
Rotação	4000 rpm
Velocidade de corte	37,7 m/min
Fluido refrigerante	Corte a seco

Tabela 3: Planejamento de experimentos.

Experimento	Avanço por dente (mm)	Velocidade de avanço (mm/min.)
1	0,001	80
2	0,055	440
3	0,04	320
4	0,025	200

Devido às limitações de utilização de laboratórios nas instituições federais de ensino por um grande período durante a pandemia, ainda não foi possível realizar a caracterização dos materiais das amostras seja pela microestrutura ou dureza.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os principais resultados relativos às análises das forças de corte experimentais, das ferramentas utilizadas e dos canais dos experimentos. Também são feitas discussões sobre a comparação entre as amostras.

3.1 Forças de corte

Os sinais das forças de corte consistem nas componentes nos eixos X, Y e Z, de acordo com a Fig. 4. Para fins de cálculo e análise, a componente axial foi desprezada, pois ela é consideravelmente menor do que as forças no plano XY. Os sinais foram analisados no campo da frequência para verificação das frequências dominantes e da possível necessidade de aplicação de um filtro. Como a rotação utilizada nos experimentos foi de 4000 rpm, espera-se encontrar picos de amplitudes em frequências múltiplas de 33 Hz. Como é visto na Fig. 5, as maiores amplitudes acontecem nas frequências 66, 133 e 267 Hz, como era esperado para o sinal.

A Fig. 6(a) mostra um exemplo do sinal de F_x e F_y adquirido pelo dinamômetro para duas rotações da ferramenta,

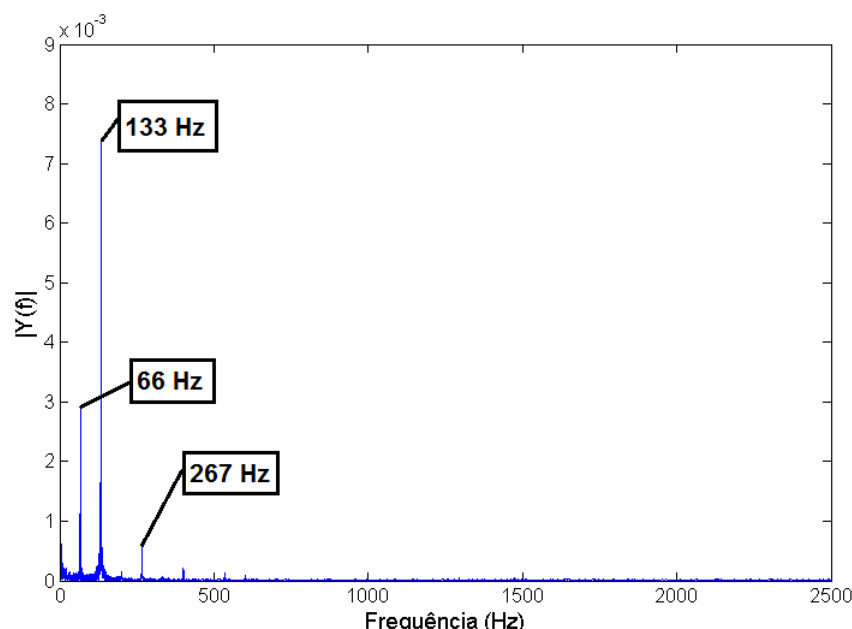


Figura 5: Resultado da FFT aplicada no sinal do experimento na amostra RA com avanço de 0,004 mm/dente.

considerando apenas as componentes no plano XY. Como a fresa utilizada possui dois dentes, é possível observar dois picos de força para cada rotação. Idealmente, ambas forças máximas seriam iguais, porém há diversas fontes de perturbações no processo de corte que levam um dente a retirar mais material que o outro como, por exemplo, o *run-out* da ferramenta, deformação devido à flexão e vibrações. Além disso, o corte diferenciado entre os dentes faz com que ocorra desgastes desiguais também entre as arestas.

Para prosseguir com a análise das forças, foi computada a força resultante, considerando as componentes F_x e F_y , que pode ser vista na Fig. 6(b) para um dos experimentos. Em seguida, foram computados os máximos da força resultante em 40 rotações e feita a média desses valores. Dessa forma, tem-se o caso mais crítico de carregamento da ferramenta.

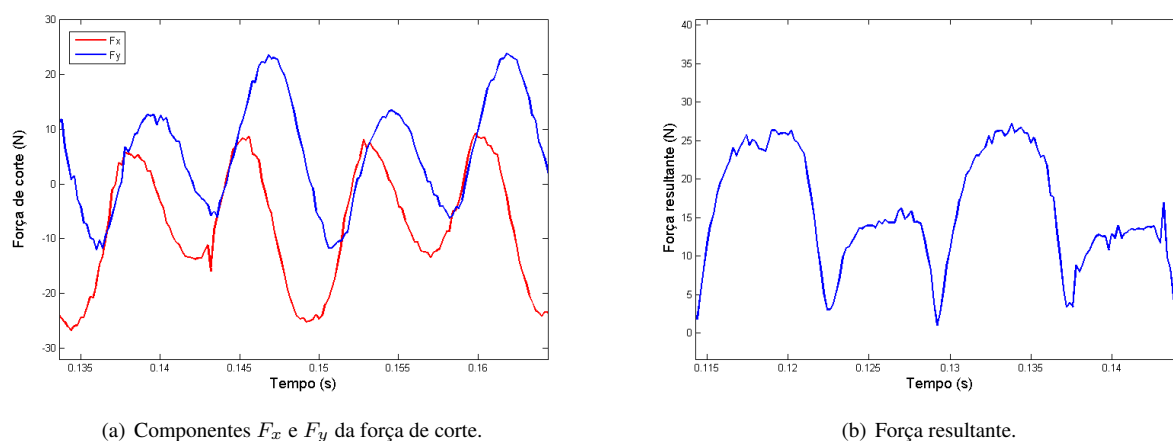


Figura 6: Exemplo do sinal de forças para um dos experimentos para duas rotações.

A Fig. 7 apresenta os resultados da média da força resultante máxima considerando 40 rotações. As barras de erro foram calculadas com percentil 0,05. Como pode ser visto para todas as amostras, os valores da força resultante seguiram a teoria de usinagem clássica para processos na escala macro, ou seja, quando maior o avanço por dente, maior a força de corte. Essa relação direta se dá pois ao aumentar o avanço, aumenta-se a área de contato entre a ferramenta de corte e o material e, conseqüentemente, a força aumenta. Dessa forma, para a configuração proposta nesse trabalho, pode-se descartar a ocorrência predominante do fenômeno de *ploughing*, pois quando há essa predominância, é possível verificar comportamentos fora do padrão em avanços próximos à espessura mínima de corte.

Também pode ser observado na figura que a amostra RA, resfriada em água, apresentou forças de corte maiores para todos os avanços quando comparada com a amostra como recebido. Esse resultado está de acordo com o esperado, pois esperava-se que a alta taxa de resfriamento imposta pela água levasse à formação de martensita e, conseqüentemente, a um aumento na resistência e dureza do material. Como as forças de corte foram maiores, uma das possíveis hipóteses é de que o tratamento obteve êxito e, de fato, o material tornou-se mais resistente. Além disso, as forças de corte da amostra RF, resfriada em forno, foram consideravelmente menores do que dos outros materiais. Esse resultado indica que ocorreu uma

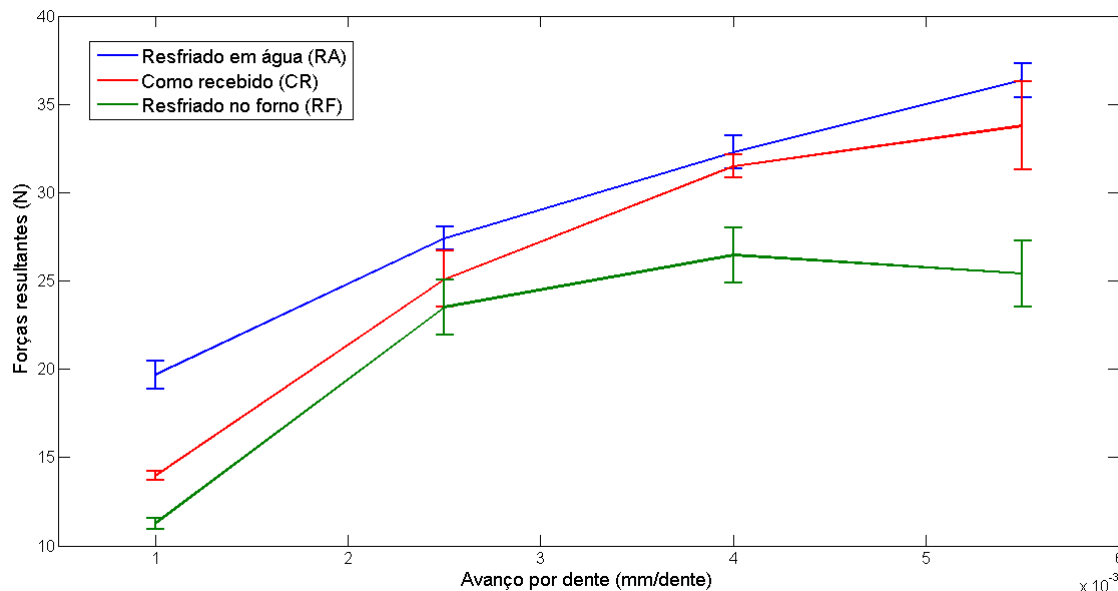


Figura 7: Comparação das forças resultantes máximas entre as amostras de liga de titânio.

queda na resistência do material devido ao tratamento térmico. Isso pode ter ocorrido pela taxa de resfriamento mais lenta do que o esperado, o que pode ter levado o material a ficar exposto à altas temperaturas por mais tempo do que o previsto ocasionando o crescimento dos grãos da microestrutura. Como se sabe pela Equação de Hall-Petch, a resistência de um material está diretamente relacionada com o tamanho dos seus grãos de forma que grãos refinados levam ao aumento da resistência e grãos mais grosseiros à diminuição.

3.2 Canais e formação de rebarba

As imagens dos canais fresados são mostradas na Fig. 8. Dessas imagens pode-se tirar duas observações importantes. A primeira é sobre a possibilidade de predominância de *ploughing* durante o corte. Analisando a superfície gerada no processo, não há sinal característico desse fenômeno como marcas no sentido contrário do avanço (*back cutting*). Como as imagens mostram os canais para o menor avanço utilizado, é possível afirmar que durante o fresamento houve predominância de corte por cisalhamento, não havendo presença perceptível de *ploughing*. Os canais para os outros avanços seguiram o mesmo padrão. A presença de partes mais escuras em alguns pontos das imagens se deve à iluminação artificial do microscópio que gerou diferenças de luminosidade.

Outra análise importante pode ser feita sobre a formação de rebarba, de forma qualitativa. As figuras mostram nitidamente a formação de rebarbas de topo, especialmente nas laterais dos canais. É possível afirmar que a amostra CR apresentou uma formação de rebarba consideravelmente menor do que as amostras tratadas termicamente. Além disso, a amostra resfriada em água apresentou maior formação de rebarba. Esse padrão se repetiu para os outros avanços.

Além dos parâmetros de corte utilizados, as propriedades mecânicas da peça usinada estão diretamente ligadas à formação de rebarba. De forma geral, materiais mais dúcteis tendem a gerar maior formação de rebarba, pois com uma capacidade de alongamento maior, o material se deforma mais antes de romper. Assim, caso outros fatores, como os parâmetros de corte, levem a um volume baixo de remoção de material, por vezes a quantidade de deformação imposta ao material não é o suficiente para seu rompimento total, ficando o cavaco preso à peça. Como as forças de corte para a amostra resfriada em água foram maiores, espera-se que com o aumento na sua resistência, sua ductilidade tenha diminuído. Porém, nitidamente, essa amostra apresentou maior formação de rebarba. O aumento de resistência e ductilidade de forma concomitante na liga de titânio Ti-6Al-4V pode ocorrer quando, além da formação de martensita α , também ocorre o refinamento dos grãos da fase β , que usualmente são grosseiros, como mostra Chong *et al.* (2017).

3.3 Ferramentas de corte

A análise das ferramentas utilizadas nos experimentos foi feita apenas para verificação da sua integridade, pois foi utilizada duas ferramentas no total: as amostras CR e RA foram usinadas com uma ferramenta; e a amostra RF e uma quarta amostra não utilizada no trabalho foram usinadas com uma segunda ferramenta. Dessa forma, cada ferramenta de corte usinou canais.

Podem ser vistas nas Fig. 9a, 9b e 9c as imagens obtidas com o microscópio digital da ferramenta como nova e após os experimentos. De forma geral, as ferramentas se encontram em bom estado. A ferramenta usada nas amostras CR e RA (Fig. 9b) apresenta um lascado em uma das pontas. Porém, esse fato, muito provavelmente, ocorreu no final da usinagem do último experimento feito com ela na amostra RA quando, por um erro de cálculo, ela acabou passando por uma parte não planejada, aumentando de forma significativa a profundidade de corte. Fato esse que pode ser comprovado pelo sinal

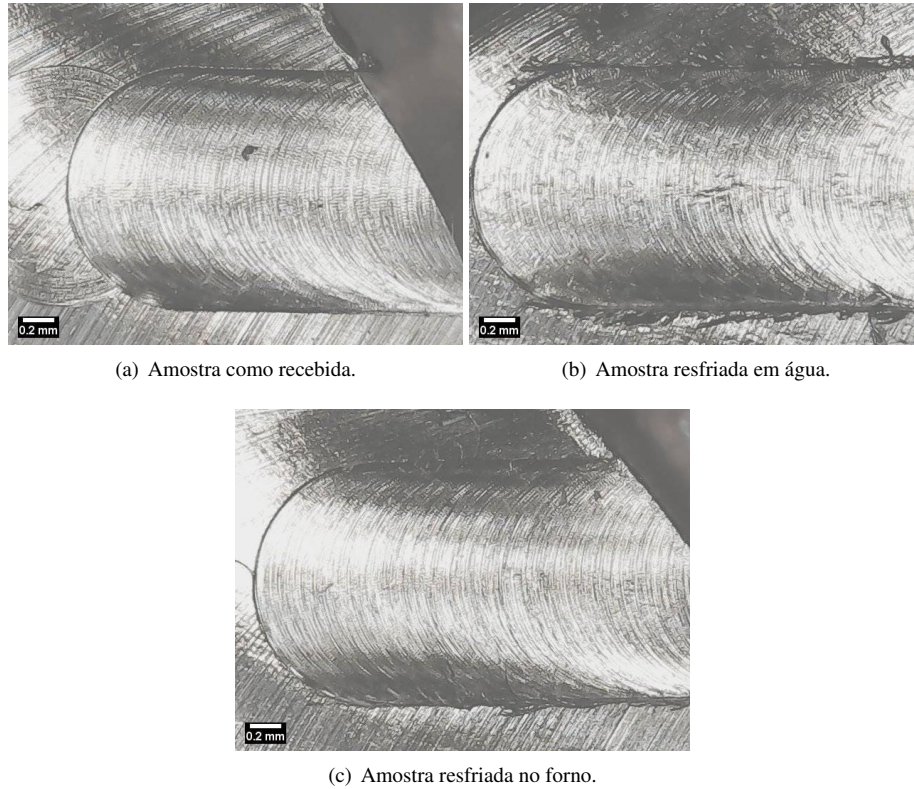


Figura 8: Imagens dos canais usinados com avanço de 0,001 mm/dente.

da força desse canal apresentado na Fig. 9d. É importante ressaltar que, por ter sido o último canal usinado da amostra RA, essa ferramenta não foi utilizada mais para nenhum dos experimentos seguintes, tendo sido trocada a ferramenta de corte.

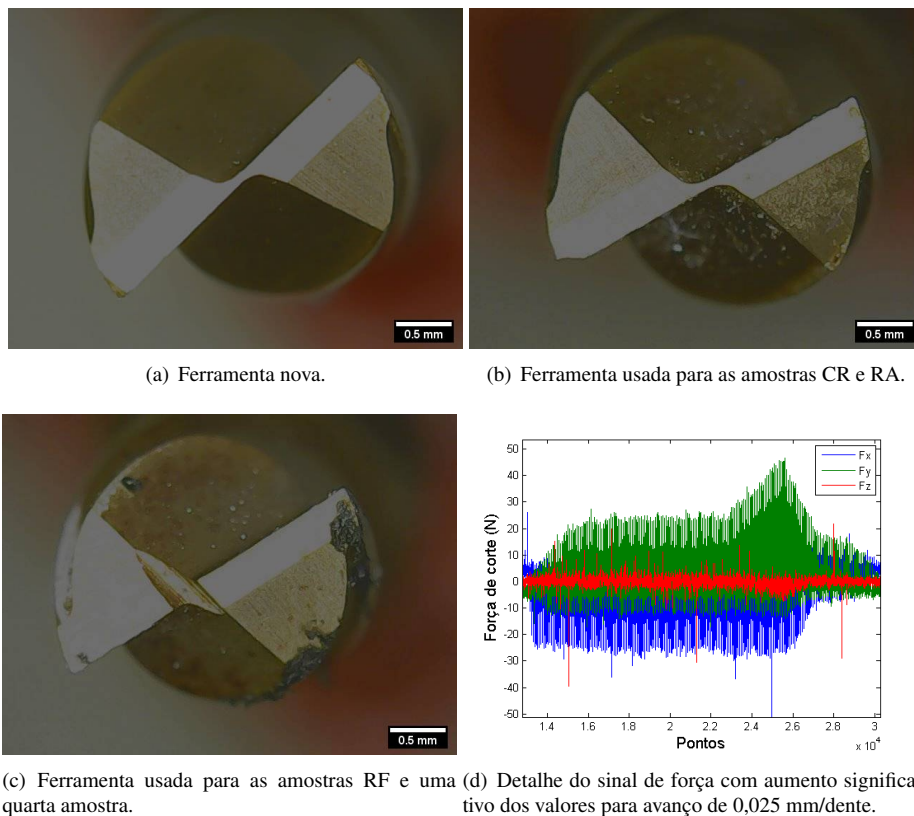


Figura 9: Imagens das ferramentas como nova e após os experimentos.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho lidou com a análise da usinagem de amostras de Ti-6Al-4V tratadas termicamente para verificar possíveis influências da microestrutura no fresamento, utilizando parâmetros de corte pequenos com avanços por dente da mesma grandeza do raio da aresta, e verificar a possível ocorrência de *ploughing* durante o corte relacionando com o que ocorre no microfresamento. As seguintes conclusões podem ser tiradas após a análise dos resultados:

- Devido às limitações por tempo prolongado na utilização de laboratórios nos institutos federais, não foi possível realizar a caracterização microestrutural e por dureza das amostras tratadas. Entretanto, os autores acreditam que os resultados experimentais de usinagem ainda são relevantes;
- Analisando a influência do avanço por dente nas forças de corte das amostras, notou-se o comportamento esperado com o aumento das forças com o aumento do avanço, o que ocorre pelo aumento da área de contato da ferramenta com o material;
- Considerando os parâmetros de corte propostos neste trabalho, não foi observada ocorrência de *ploughing* durante a usinagem de nenhuma das amostras. Esta conclusão se deve pelo comportamento das forças com o avanço e pela análise das superfícies geradas nos canais usinados, onde não foi visto algum sinal desse fenômeno;
- Comparando os valores de força na usinagem entre as amostras, pode-se perceber que o tratamento térmico com resfriamento em água gerou um aumento na resistência do material já que as forças observadas foram maiores, indicando a formação de martensita α na microestrutura do material, como esperado. Além disso, pra amostra resfriada no forno, as forças foram menores do que no material como recebido, indicando uma queda na resistência. Como foi observada uma taxa de resfriamento consideravelmente mais lenta do que o esperado, pode ter ocorrido o crescimento dos grãos, o que explicaria a queda na resistência e as forças menores;
- Analisando os canais usinados, pode ser observado uma maior ocorrência na formação de rebarba nas amostras tratadas do que na como recebido. A amostra resfriada no forno, por ter tido uma queda na resistência mecânica, pode ter tido sua ductilidade elevada, o que explicaria a maior formação de rebarba. Já para a amostra resfriada em água, durante o tratamento, pode ter ocorrido, além da formação de martensita, o refinamento dos grãos da fase β , explicando o concomitante aumento da ductilidade.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer aos docentes Fabrício Lopes, coordenador do Laboratório de Metalografia do campus Nova Iguaçu do Cefet-RJ, e Tatiane Chuvas, coordenadora do Laboratório de Usinagem do campus Maracanã do Cefet-RJ. Também gostariam de agradecer ao técnico do Laboratório de Usinagem Brenno Tavares Duarte e ao doutorando Rafael da Cunha Hamano pela ajuda nos experimentos.

6. REFERÊNCIAS

- Abbasi, S., Feng, P., Ma, Y., Zhang, J., Yu, D. and Wu, Z., 2016. "Influence of microstructure and hardness on machinability of heat-treated titanium alloy ti-6al-4v in end milling with polycrystalline diamond tools". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 86, pp. 1–13.
- Amorim, A.A. and Almeida, A.B.L.d., 2009. "Titânio". Report, Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília - BRA.
- Araújo, A.C., Mougo, A.L. and Campos, F.O., 2020. *Usinagem para Engenharia: Um curso de mecânica do corte*. E-Papers, Rio de Janeiro, Brasil.
- Bonaiti, G., Parenti, P., Annoni, M. and Kapoor, S., 2017. "Micro-milling machinability of ded additive titanium ti-6al-4v". *Procedia Manufacturing*, Vol. 10, pp. 497–509. ISSN 2351-9789.
- Campos, F.O., Araujo, A.C., Jardim Munhoz, A.L. and Kapoor, S.G., 2020. "The influence of additive manufacturing on the micromilling machinability of ti-6al-4v: A comparison of slm and commercial workpieces". *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 60, pp. 299–307. ISSN 1526-6125.
- Chong, Y., Bhattacharjee, T., Yi, J., Shibata, A. and Tsuji, N., 2017. "Mechanical properties of fully martensite microstructure in ti-6al-4v alloy transformed from refined beta grains obtained by rapid heat treatment (rht)". *Scripta Materialia*, Vol. 138, pp. 66–70. ISSN 1359-6462.
- Cortez, L.D. and Reis, D.A.P., 2007. "Tratamentos térmicos da liga ti-6al-4v para realização de ensaio de fluência." *130 Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA*.
- Dehghan, S., Soury, E. and Ismail, M.I.S.b., 2021. "A comparative study on machining and tool performance in friction drilling of difficult-to-machine materials aisi304, ti-6al-4v, inconel718". *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 61, pp. 128–152. ISSN 1526-6125.
- Donachie, M.J., 2000. *Titanium: A Technical Guide, Second Edition*. AMS International, USA.
- Welsch, G., 1994. *Material Properties Handbook: Titanium Alloys*. Gerhard Welsch, Massachusetts, USA.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

INFLUENCE OF THE MICROSTRUCTURE ON THE CUTTING FORCES WHEN MILLING TITANIUM ALLOY Ti-6Al-4V

Matheus Felipe Ribeiro Santos, matheus.santos.5@aluno.cefet-rj.br¹

Fábio de Oliveira Campos, fabio.campos@cefet-rj.br²

¹Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)

Abstract: *The use of titanium and its alloys, especially the Ti-6Al-4V, is widely spread in aerospace and biomedical industries because of their low specific mass and high corrosion resistance, properties that are valued, especially on the manufacturing of biomedical and dental implants. The use of the alloy with aluminium and vanadium happens because of its higher tensile strength regarding pure titanium (CP-Ti), but maintaining the biocompatibility high enough for the application. Milling and micromilling are processes with important applications, especially, in the biomedical area. It is known that on the microscale, there is a higher tendency of happening ploughing during cutting, depending on the cutting parameters. This phenomenon also can happen on the macroscale if feed per tooth values are close enough to the cutting edge radius of the tool. In micromilling, microstructure has a fundamental role on machining results because cutting parameters are on the same scale of grain size, which has been already deeply studied by literature. This paper has the objective of analyzing the influence of the microstructure on the cutting forces when milling in macroscale the Ti-6Al-4V alloy when occurring ploughing, which means using cutting parameters close to the cutting edge radius. Different microstructures are obtained through heat treatments. Considering the parameters of this work, it was concluded that microstructure deeply affects cutting force values, but no ploughing was detected during cutting.*

Keywords: *Milling, Micromilling, Ti-6Al-4V, Microstructure, Cutting forces*