

## MODELAGEM ESTATÍSTICA DOS ESFORÇOS DE CORTE DE PEÇAS TORNEADAS NAS LIGAS DE TITÂNIO Ti-6Al-7Nb E Ti-6Al-4V

Jéssica Tito Vieira, [jessica.tito@hotmail.com](mailto:jessica.tito@hotmail.com)<sup>1</sup>

Amanda Oliveira Mello, [amandamello@live.com](mailto:amandamello@live.com)<sup>1</sup>

Wasley Amaral Coelho, [wasleyamaral@hotmail.com](mailto:wasleyamaral@hotmail.com)<sup>1</sup>

Samuel Alves de Freitas, [samuelengmec@gmail.com](mailto:samuelengmec@gmail.com)<sup>1</sup>

Lincoln Cardoso Brandão, [lincoln@ufs.br](mailto:lincoln@ufs.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de São João del Rei – Departamento de Engenharia Mecânica, Praça Frei Orlando, 170 – Centro, São João Del Rei-MG, 36.307-352, Brasil.

**Resumo:** O torneamento é um dos processos de fabricação mais utilizados na indústria metal-mecânica de diversos segmentos. E conhecer o comportamento e a ordem de grandeza dos esforços de corte nos processos de usinagem é muito importante, pois os mesmos tem influência sobre a energia final gasta no processo. Peças usinadas em ligas de titânio têm sido aplicadas com sucessos em diversos ramos, como na indústria aeronáutica, aeroespacial, automotiva, naval e na engenharia biomédica. Esse estudo analisou, de acordo com um planejamento de superfície de resposta, a influência dos parâmetros velocidade de corte, profundidade de corte e o avanço nos esforços de corte de peças usinadas nas ligas Ti-6Al-4V e Ti-6Al-7Nb. Corpos de prova com dimensões de 50 mm de diâmetro e 14 mm de comprimento foram usinados em um centro de torneamento e os esforços de corte foram monitorados utilizando um dinamômetro piezoelétrico estacionário Kistler 9272. Por meio da análise de variância (ANOVA) demonstrou-se os efeitos das variáveis significativas nos esforços de corte, onde a profundidade de corte, o avanço e a classe da ferramenta foram estatisticamente significativa nas respostas analisadas.

**Palavras-chave:** titânio, torneamento, esforços de corte, superfície de resposta.

### 1. INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação consistem na modificação de uma matéria-prima visando obter um produto acabado. Eles são classificados em processos primários, sem remoção de cavaco, e secundários, com remoção de cavaco. Dentre os processos de fabricação secundários está a usinagem convencional com ferramentas de geometria definida. Entre os processos de usinagem, o torneamento é um dos mais utilizados na indústria de diversos segmentos.

Considerando os processos de fabricação de forma mais ampla, Walker (2004) afirma que é difícil citar algum produto que não necessite, direta ou indiretamente, de algum processo de usinagem ao longo de sua manufatura. A usinagem tem a vantagem de não alterar as propriedades do material, além de produzir peças com alto grau de precisão e de acabamento superficial.

É possível observar que os processos de usinagem têm obtido relevância nas indústrias, sendo associados à metrologia e controle estatístico, visando à produção de peças de alta qualidade e confiabilidade. Nesta realidade, vem crescendo o interesse pelo desenvolvimento de ligas de titânio, que são mais resistentes que as ligas de alumínio. Essas ligas têm sido aplicadas com sucessos em diversos ramos, como na indústria aeronáutica, aeroespacial, automotiva, naval e até mesmo na engenharia biomédica.

As características metalúrgicas das ligas de titânio as tornam mais difíceis de serem usinadas que ligas de aço com mesma dureza. Essas ligas tendem a reagir quimicamente com o material das ferramentas de corte, causando desgaste rápido das mesmas. Além disso, as peças de titânio tendem a apresentar danos na superfície caso sejam usadas técnicas incorretas de usinagem (ASM, 1988).

Considerando a importância das ligas de titânio e as dificuldades encontradas no processo de usinagem das mesmas, torna-se relevante e necessário o estudo da influência dos parâmetros de corte nos esforços de corte das peças usinadas. A otimização destes parâmetros permitirá a fabricação de peças com maior qualidade e menores custos de produção.

## 1.1 Esforços de corte

O entendimento do comportamento dos esforços de corte durante a usinagem permite a compreensão dos resultados obtidos durante o processo. Conforme Bartarya e Choudhury (2012), forças de corte podem proporcionar um melhor entendimento do processo de usinagem por elas se relacionarem diretamente às condições de corte e às condições das ferramentas durante a usinagem.

De acordo com Diniz *et al.* (1999), Machado *et al.* (2009) e Ferraresi (1977), o conhecimento dos esforços de corte e seu comportamento são muito importantes, por permitir que seja estimado a potência necessária para o corte, as forças atuantes nos elementos da máquina-ferramenta, além de manter relação com o desgaste das ferramentas de corte. Permite também determinar o rendimento da máquina para diferentes cargas e velocidades de trabalho. O entendimento dos esforços de corte pode possibilitar, ainda, a obtenção de tolerâncias apertadas, influenciando assim, a viabilidade econômica do processo de usinagem.

Os esforços de corte aos quais uma peça está submetida durante o processo de torneamento possuem, na maior parte das vezes, componentes em três dimensões, conforme demonstrado na Figura 1. As principais componentes de esforços de corte estudadas são nomeadas força de corte ( $F_c$ ), força de avanço ( $F_f$ ) e força passiva ( $F_p$ ) e, por convenção, são apresentadas em um único ponto como o esforço realizado pela peça a ser usinada sobre a ferramenta de usinagem.

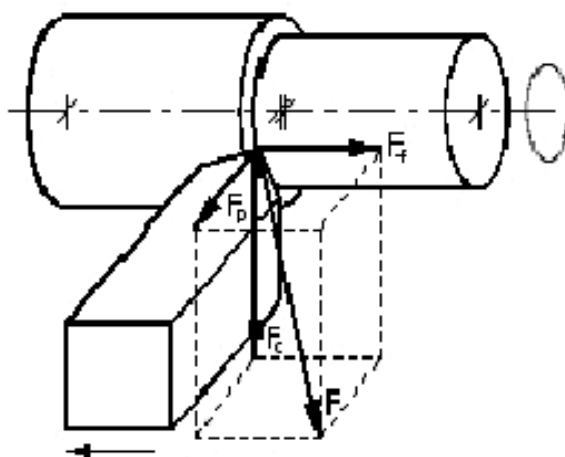


Figura 1. Componentes dos esforços de corte  $F_p$ ,  $F_c$  e  $F_f$  (DINIZ, 2003).

O conhecimento de quais fatores interferem na geração dos esforços de corte bem como a maneira que cada fator influencia esses esforços se mostra de grande importância dentro do processo de torneamento. O conhecimento prévio do comportamento dos esforços de corte no material a ser trabalhado é necessário para o desenvolvimento de máquinas-ferramenta e outros dispositivos, como porta-ferramentas, que sejam adequadamente rígidos para executar trabalhos precisos e livres de vibração.

## 1.2 O Titânio

O Titânio (Ti) é o quarto material metálico estrutural mais abundante na terra, é extremamente dúctil e não apresenta resistência mecânica significativa. Entretanto, a liga Ti-6Al-7Nb, que apresenta na sua composição Alumínio e Nióbio, demonstra consideráveis características como alta resistência à tração e elevada dureza. Além disso, a resistência à corrosão e a baixa densidade colocam a liga Ti-6Al-7Nb entre as principais escolhas na aplicação industrial, principalmente em aplicações biomédicas e aeroespaciais.

De acordo com Jaffery e Matinvenga (2009), a extração comercial do Titânio, além do seu estudo e aplicação, iniciou-se somente após a década de 1940. Além das aplicações industriais tradicionais que foram o ponto inicial para o desenvolvimento de ligas de Titânio, a liga Ti-6Al-7Nb vem sendo pesquisada desde a década de 1970 devido à sua aplicação como biomaterial.

O desenvolvimento de pesquisas na área de usinagem do Titânio e suas ligas apresenta diversas lacunas a serem preenchidas, principalmente na produção de componentes biomédicos e aeronáuticos. Pode-se trabalhar o Titânio com qualquer processo de fabricação tradicional e não tradicional. Entretanto, de forma geral, o domínio das variáveis que envolvem os processos mais tradicionais, como torneamento, furação e fresamento, ainda é modesto. Para os processos não tradicionais a falta de informações tecnológicas é ainda maior.

Pode-se considerar que o Titânio e suas ligas estão na classe dos materiais difíceis de usinar. Isto ocorre devido ao fato do Titânio apresentar baixa condutibilidade térmica, o que provoca um fluxo de calor durante o processo de usinagem, maior na ferramenta do que na peça. Além disso, o titânio apresenta elevada reatividade química, o que acelera, devido à interatividade dos materiais, o processo de difusão com a ferramenta de corte, muito comum no

processo de torneamento, pois essas ferramentas de torneamento também possuem na composição química da sua cobertura o elemento Titânio.

A faixa de produtos fabricados com ligas de Titânio como, por exemplo, as ligas Ti-6Al-4V e Ti-6Al-7Nb, é muito variada, porém o maior gargalo da produção destes componentes está no aumento do processo produtivo. A grande dificuldade está no consumo de ferramentas, que é muito maior se comparado à usinagem de outros materiais metálicos. Isto inviabiliza a produção de componentes em grande escala e, conseqüentemente, a diminuição dos custos de produção.

O torneamento é um processo de fabricação muito usado na indústria, porque aumenta a produtividade e reduz o consumo de energia. Em projetos de usinagem, a rugosidade da superfície das peças produzidas é um requisito importante que influencia propriedades como resistência mecânica e resistência à fadiga. Diante disso, alguns pesquisadores têm estudado o torneamento considerando diferentes parâmetros de processo.

Jagadesh (2014) estudou os esforços de corte e a rugosidade durante o processo de micro torneamento na liga de Ti-6Al-4V com uma ferramenta revestida de metal duro, ele concluiu que o aumento da velocidade de corte tendeu a diminuir os esforços de corte.

Xie et al. (2013) teve como objetivo estudar o quanto a forma e o tamanho das micro ranhuras produzidas na ferramenta influenciam a temperatura de corte e os esforços de corte no torneamento a seco da liga de titânio. Os autores concluíram que a ferramenta com micro ranhuras de profundidade de 25  $\mu\text{m}$  e a maior taxa de remoção de material, reduz a temperatura de corte e os esforços de corte de forma mais significativa no torneamento em relação a ferramenta plana tradicional.

Já Dorlin et al. (2016) desenvolveu um modelo mecânico para melhorar a previsão dos esforços de corte durante as operações de torneamento na liga de titânio Ti-6Al-4V, os resultados do modelo proposto foram então comparado com um modelo comumente usado. Concluíram assim que o modelo de força de corte proposto fornece uma previsão mais precisa dos esforços de corte.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos de usinagem foram realizados no Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João Del Rei (UFSJ). Foram torneadas peças nas ligas Ti-6Al-7Nb e Ti-6Al-4V, em um centro de torneamento ROMI GL 240-M com velocidade de avanço rápido longitudinal e transversal de 30 m/min, rotação máxima de 6.000 rpm e potência máxima na árvore de 22,5 KW, conforme Fig. 1.



**Figura 2. Centro de torneamento ROMI GL 240-M.**

Os corpos de prova utilizados foram previamente fabricados em formato cilíndrico, com dimensões de 50 mm de diâmetro e 14 mm de comprimento. Os detalhes da fixação do corpo de prova são apresentados na Fig. (1b). No processo de torneamento, a fixação dos corpos de prova foi realizada diretamente no torno, usando-se uma placa de três castanhas. As ferramentas utilizadas apresentavam os códigos ISO TCMW 11 03 04 H13A e TCMW 11 03 04 3215. Os parâmetros do processo de torneamento, descritos na Tabela 1, foram definidos de acordo com informações do fabricante das ferramentas.

**Tabela 1. Parâmetros de entrada empregados no processo de torneamento.**

| Variáveis de entrada        | Níveis |      |
|-----------------------------|--------|------|
|                             | -1     | +1   |
| Velocidade de corte [m/min] | 50     | 75   |
| Profundidade de corte [mm]  | 0,20   | 1,00 |
| Avanço [mm/rot]             | 0,05   | 0,25 |

|                    |                      |                      |
|--------------------|----------------------|----------------------|
| Liga de Titânio    | Ti-6Al-4V            | Ti-6Al-7Nb           |
| Tipo de Ferramenta | TCMW 11 03 04 - H13A | TCMW 11 03 04 - 3215 |

Os experimentos de torneamento foram aleatorizados através de um planejamento estatístico de superfície de resposta. As variáveis de entrada foram a velocidade de corte, a profundidade de corte e o avanço da ferramenta. Cada condição experimental foi testada variando a liga de titânio e a ferramenta, totalizando 80 experimentos. As variáveis de resposta do processo de torneamento foram a força passiva, a força de corte e a força de avanço.

Para com quatro canais e o monitoramento dos esforços de corte foi utilizado um dinamômetro piezoelétrico estacionário Kistler 9272 software DynoWare também fornecido pela Kistler.

### 3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As respostas foram analisadas pela técnica de Análise de Variância (ANOVA), adotando 95% de intervalo de confiança, isto representa um nível de significância de 5%. Desta forma, um Valor-P menor ou igual a 0,05 (5%) indica quais fatores de entrada são estatisticamente significativos.

A técnica permite também verificar a adequação do modelo, indicando na análise os coeficientes de determinação  $R^2$ ,  $R^2_{adj}$  e  $R^2_{pred}$ , nos quais apresentam que o modelo possui um bom ajuste aos dados quando seus valores estão acima de 70%.

A Tabela 2 apresenta os resultados estatísticos demonstrando a influência dos parâmetros de entrada sobre as respostas força passiva, força de avanço e força de corte.

**Tabela 2. Análise de variância (ANOVA) para as respostas força passiva, força de avanço e força de corte.**

| Fonte                                               |                 | Força passiva               | Força de avanço                   | Força de corte                      |
|-----------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
|                                                     |                 | P-valor                     | P-valor                           | P-valor                             |
| <i>Efeitos Principais</i>                           |                 |                             |                                   |                                     |
| Velocidade de corte                                 |                 | 0,969                       | 0,495                             | 0,195                               |
| Profundidade de corte                               |                 | <b><u>0,001</u></b>         | <b><u>0,000</u></b>               | <b><u>0,000</u></b>                 |
| Avanço                                              |                 | <b><u>0,000</u></b>         | <b><u>0,000</u></b>               | <b><u>0,000</u></b>                 |
| Tipo de Liga                                        |                 | 0,389                       | 0,516                             | 0,497                               |
| Classe da Ferramenta                                |                 | <b><u>0,000</u></b>         | <b><u>0,000</u></b>               | <b><u>0,000</u></b>                 |
| <i>Modelo Quadrático</i>                            |                 |                             |                                   |                                     |
| Velocidade de corte vs. Velocidade de corte         |                 | 0,273                       | 0,127                             | 0,445                               |
| Profundidade de corte vs. Profundidade de corte     |                 | 0,131                       | <b><u>0,003</u></b>               | <b><u>0,015</u></b>                 |
| Avanço vs. Avanço                                   |                 | 0,199                       | 0,522                             | <b><u>0,009</u></b>                 |
| <i>Interação dois a dois</i>                        |                 |                             |                                   |                                     |
| Velocidade de corte vs. Profundidade de corte       |                 | 0,680                       | 0,487                             | 0,203                               |
| Velocidade de corte vs. Avanço                      |                 | 0,972                       | 0,224                             | <b><u>0,014</u></b>                 |
| Velocidade de corte vs. Tipo de Liga                |                 | 0,881                       | 0,853                             | 0,852                               |
| Velocidade de corte vs. Classe da Ferramenta        |                 | 0,698                       | 0,680                             | 0,722                               |
| Profundidade de corte vs. Avanço                    |                 | 0,356                       | <b><u>0,000</u></b>               | <b><u>0,000</u></b>                 |
| Profundidade de corte vs. Tipo de Liga              |                 | 0,659                       | 0,075                             | 0,077                               |
| Profundidade de corte vs. Classe da Ferramenta      |                 | 0,125                       | 0,703                             | <b><u>0,026</u></b>                 |
| Avanço vs. Tipo de Liga                             |                 | 0,300                       | 0,345                             | 0,152                               |
| Avanço vs. Classe da Ferramenta                     |                 | 0,121                       | 0,927                             | 0,726                               |
| Tipo de Liga vs. Classe da Ferramenta               |                 | <b><u>0,021</u></b>         | 0,761                             | 0,917                               |
| <b><i>Ajuste do modelo para Força passiva</i></b>   | <b><i>S</i></b> | <b><i>R<sup>2</sup></i></b> | <b><i>R<sup>2</sup> (Adj)</i></b> | <b><i>R<sup>2</sup> (prev.)</i></b> |
| Valor                                               | 9,58635         | 82,74%                      | 76,90%                            | 68,24%                              |
| <b><i>Ajuste do modelo para Força de avanço</i></b> | <b><i>S</i></b> | <b><i>R<sup>2</sup></i></b> | <b><i>R<sup>2</sup> (Adj)</i></b> | <b><i>R<sup>2</sup> (prev.)</i></b> |
| Valor                                               | 14,3508         | 91,88%                      | 89,13%                            | 84,63%                              |
| <b><i>Ajuste do modelo para Força de corte</i></b>  | <b><i>S</i></b> | <b><i>R<sup>2</sup></i></b> | <b><i>R<sup>2</sup> (Adj)</i></b> | <b><i>R<sup>2</sup> (prev.)</i></b> |
| Valor                                               | 9,82317         | 98,98%                      | 98,63%                            | 97,94%                              |

### 3.1 Força passiva

Conforme a análise de variância (ANOVA) para a força passiva, o  $R^2$  (ajustado) encontrado foi 76,90%. Esse valor indica o quanto os resultados obtidos se ajustam perante o modelo de regressão dos dados.

A partir da Tabela 2, é possível observar que os parâmetros de entrada; profundidade de corte, avanço da ferramenta e a classe da ferramenta quando analisados separadamente, apresentam influência significativa nos resultados de força passiva. Os P-valores encontrados para os três fatores que apresentam influência significativa na resposta analisada são 0,001, 0,000 e 0,000 respectivamente.

Ainda, a interação entre os fatores tipo de liga e classe da ferramenta apresentou P-Valor igual 0,021, portanto, demonstrou influência significativa para a força passiva.

Nenhum dos fatores quadrados foram significativos, dessa forma é possível interpretar que a força passiva terá um comportamento linear como resultado da alteração dos fatores principais e interação de fatores.

Na Figura 3 são apresentados os gráficos de efeitos principais para os três fatores que demonstraram influência significativa nos resultados de força passiva, a profundidade de corte, o avanço e a classe da ferramenta.

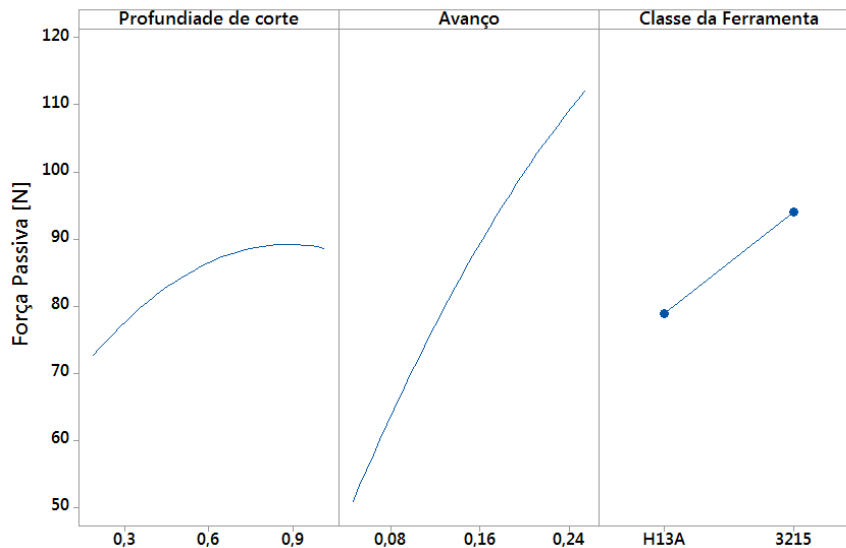


Figura 3. Gráfico de efeitos principais para a força passiva.

O aumento da profundidade de corte entre os valores de 0,3 mm e 0,9 mm resultou em um aumento da força passiva. Dentro da variação do fator avanço, a força passiva apresentou um aumento de aproximadamente 100% entre os valores mínimos e máximos estudados para esse fator. Para o avanço de 0,08 mm/rot a força passiva média encontrada foi de aproximadamente 52,58 N, enquanto que para o avanço de 0,24 mm/rot a força passiva média foi de 115,4 N.

A ferramenta com a classe H13A apresentou uma tendência a reduzir a força passiva.

As equações (1), (2), (3) e (4) mostram a modelagem matemática da resposta força passiva de acordo com a variação dos parâmetros de entrada. Nas equações (1) e (2) foi mantido o tipo de ferramenta (H13A) e variada a liga, sendo mantida nas equações (3) e (4) a mesma linha de raciocínio.

$$F_{P(Ti-6Al-4V, H13A)} = 104 - 2,96v_c + 73,2ap + 304f + 0,0249v_c^2 - 33,7ap^2 - 457f^2 - 0,375v_c * ap + 0,13v_c * f + 105ap * f \quad (1)$$

$$F_{P(Ti-6Al-7Nb, H13A)} = 95 - 3,01v_c + 78,1ap + 349f + 0,0249v_c^2 - 33,7ap^2 - 457f^2 - 0,375v_c * ap + 0,13v_c * f + 105ap * f \quad (2)$$

Nas equações (1) a (2), onde foi fixado o tipo de ferramenta (H13A) e variada a liga de titânio, observa-se que existe uma pequena variação de 8,7% entre os parâmetros constantes iniciais das equações. Além disso, pode-se considerar que os parâmetros lineares dos modelos têm variações mínimas.

Os parâmetros quadráticos dos modelos e também as interações entre os parâmetros de entrada, as constantes são as mesmas para os quatro modelos. Portanto, os modelos demonstram que os parâmetros quadráticos e as interações entre os fatores não tem influência nos modelos, fato comprovado com as suas constantes de multiplicação são idênticas para os quatro modelos.

Confirmando as informações apresentadas na Tab. 2, nota-se que o parâmetro de entrada que apresenta o maior valor de multiplicação nos modelos matemáticos é o avanço, sendo este o parâmetro mais significativo para todos os modelos.

$$F_P (Ti-6Al-4V, 3215) = 106 - 2,82v_c + 56,5ap + 371f + 0,0249v_c^2 - 33,7ap^2 - 457f^2 - 0,375v_c * ap + 0,13v_c * f + 105ap * f \quad (3)$$

$$F_P (Ti-6Al-7Nb, 3215) = 106 - 2,87v_c + 61,4ap + 416f + 0,0249v_c^2 - 33,7ap^2 - 457f^2 - 0,375v_c * ap + 0,13v_c * f + 105ap * f \quad (4)$$

### 3.2 Força de avanço

Conforme apresentado na Tab. 2, a análise de variância para a força de avanço apresentou o  $R^2$  (ajustado) de 89,13 %, demonstrando um ajuste satisfatório dos dados, portanto apresentam pequena variabilidade diante do modelo de regressão.

A partir da análise dos P-Valores é possível observar que os fatores profundidade de corte, avanço e classe da ferramenta, quando analisados separadamente, também foram estatisticamente significativos para os resultados de força de avanço obtidos. O P-Valor encontrado para os três fatores foi 0,000. Também é possível observar, ao analisar as interações das variáveis estudadas, que houve significância para a interação entre a profundidade de corte e o avanço.

Na Figura 4 são apresentados os gráficos de efeitos principais para os fatores que apresentaram influência nos resultados de força de avanço, sendo eles profundidade de corte, avanço e classe da ferramenta.

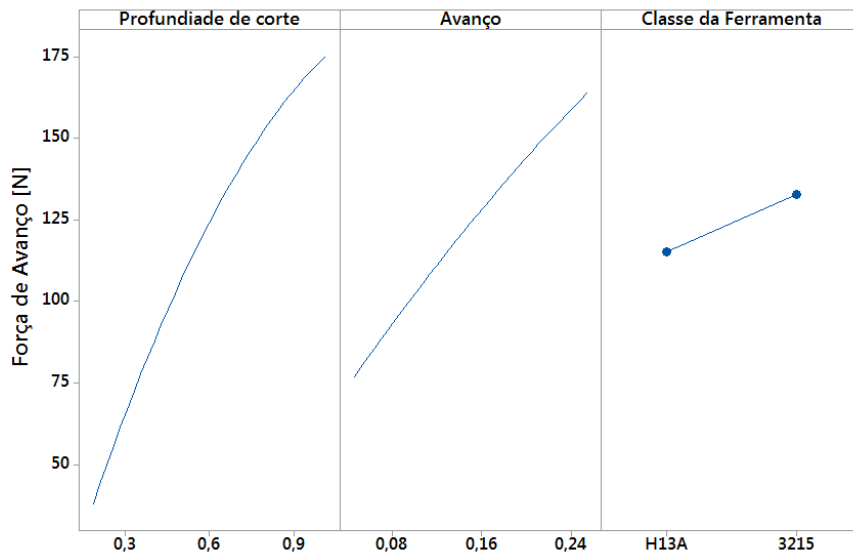


Figura 4. Gráfico de efeitos principais para a força passiva.

O comportamento observado no aumento da força de avanço em função da profundidade de corte se mostrou quase linear. A variação entre o menor e o maior valor de profundidade de corte estudado apresentou um aumento de aproximadamente 337,5 % na força de avanço.

A força de avanço, em função do fator avanço, apresentou aumento a partir do menor avanço, 0,08 mm/rot, até o avanço com maior valor, 0,24 mm/rot, onde a força de avanço passou de aproximadamente 76,5 N para 166,04 N.

As equações de (5) a (8) mostram os modelos matemáticos para a predição dos valores de força de avanço ( $F_f$ ). Observa-se que, assim como aconteceu com os modelos matemáticos para  $F_P$ , apenas para as constantes do modelo e para os valores lineares existem diferenças significativas.

$$F_f(Ti-6Al-4V, H13A) = 83 - 4,97v_c + 242,2ap + 451f + 0,0521v_c^2 - 101,1ap^2 - 339f^2 - 0,95v_c * ap - 6,65v_c * f + 761ap * f \quad (5)$$

$$F_f(Ti-6Al-7Nb, H13A) = 96 - 5,06v_c + 213,2ap + 512f + 0,0521v_c^2 - 101,1ap^2 - 339f^2 - 0,95v_c * ap - 6,65v_c * f + 761ap * f \quad (6)$$

Basicamente, pode-se observar que fixando-se as ferramentas e variando-se as ligas de titânio, a constante do modelo e o valores lineares que possuem diferenças significativas nas quatro equações apresentam valores maiores para a liga Ti-6Al-7Nb. E sendo o avanço também o parâmetro de entrada com maior coeficiente, portanto o que mais influência na força de avanço.

$$F_f(Ti-6Al-4V, 3215) = 112 - 5,18v_c + 248,4ap + 445f + 0,0521v_c^2 - 101,1ap^2 - 339f^2 - 0,95v_c * ap - 6,65v_c * f + 761ap * f \quad (7)$$

$$F_f(Ti-6Al-7Nb, 3215) = 124 - 5,28v_c + 219,3ap + 506f + 0,0521v_c^2 - 101,1ap^2 - 339f^2 - 0,95v_c * ap - 6,65v_c * f + 761ap * f \quad (8)$$

### 3.3 Força corte

O  $R^2$  (ajustado) mostrado na Tab. 2 da ANOVA para a força de corte foi 98,63%, demonstrando um ajuste satisfatório dos dados, apresentando pequena variabilidade perante o modelo de regressão.

É possível observar que, novamente, os fatores profundidade de corte, avanço e classe da ferramenta foram estatisticamente significativos, quando analisados de forma isolada. No entanto, o fator quadrado profundidade de corte e o fator quadrado avanço também apresentaram influência significativa no resultado.

A presença do fator quadrado profundidade e avanço como fatores significativos mostra uma curvatura no comportamento da força de corte. Dessa forma, é esperado que a força de corte não apresente um crescimento linear quando for avaliado o fator profundidade de corte e avanço.

As interações entre velocidade de corte e avanço, entre profundidade de corte e avanço e entre profundidade de corte e classe da ferramenta também foram estatisticamente significativas na resposta. A Figura 5 apresenta os gráficos das interações que apresentaram influência significativa nos resultados da força de corte para as condições estudadas.

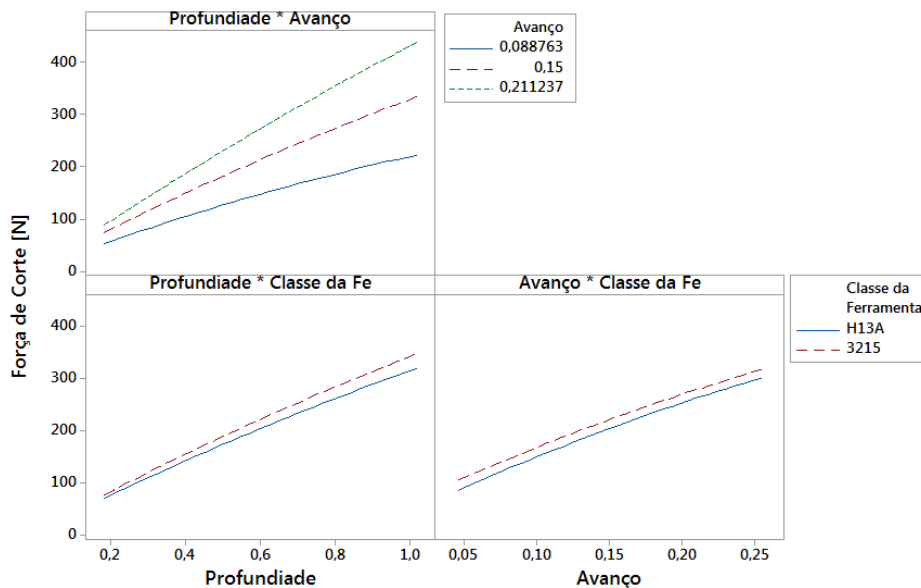


Figura 5. Gráfico de interações para a força de corte.

Os menores valores de força de corte (valores abaixo de 100 N) são esperados quando for utilizado menores valores de profundidade de corte e avanço. Ainda, o gráfico de interações apresenta o crescimento linear da força de corte com o aumento do avanço.

É possível observar que a combinação da menor profundidade de corte independentemente do valor de avanço e da classe de ferramenta utilizados resultaram em forças de corte menores.

As equações (9), (10), (11) e (12) mostram a modelagem matemática da resposta força de corte de acordo com a variação dos parâmetros de entrada. Nas equações (9) e (10) foi mantido o tipo de ferramenta (H13A) e variada a liga, sendo mantida nas equações (11) e (12) a mesma linha de raciocínio.

$$F_{c(Ti-6Al-4V, H13A)} = -68 - 0,23v_c + 185,5ap + 819f + 0,0177v_c^2 - 56,4ap^2 - 974f^2 - 1,191v_c * ap - 9,41v_c * f + 1766ap * f \quad (9)$$

$$F_{c(Ti-6Al-7Nb, H13A)} = -63 - 0,29v_c + 165,7ap + 883f + 0,0177v_c^2 - 56,4ap^2 - 974f^2 - 1,191v_c * ap - 9,41v_c * f + 1766ap * f \quad (10)$$

Confirmando as informações apresentadas na Tab. 2, nota-se que o parâmetro de entrada que apresenta o maior valor de multiplicação nos modelos matemáticos é o avanço, sendo este o parâmetro mais significativo para todos os modelos.

$$F_{c(Ti-6Al-4V, 3215)} = -55 - 0,35v_c + 210,5ap + 804f + 0,0177v_c^2 - 56,4ap^2 - 974f^2 - 1,191v_c * ap - 9,41v_c * f + 1766ap * f \quad (11)$$

$$F_{c(Ti-6Al-7Nb, 3215)} = -50 - 0,42v_c + 190,7ap + 868f + 0,0177v_c^2 - 56,4ap^2 - 974f^2 - 1,191v_c * ap - 9,41v_c * f + 1766ap * f \quad (12)$$

Os modelos matemáticos foram gerados com base nos dados experimentais obtidos, eles permitem obter a força de corte, a força de avanço e força passiva esperada para determinada combinação de profundidade de corte, velocidade de corte e avanço. Para que o resultado obtido seja confiável, é necessário que os parâmetros de usinagem variáveis estejam dentro da faixa estudada.

Se um valor fora da faixa avaliado for utilizado o resultado pode não representar a realidade por não ter sido avaliado na análise estatística anteriormente.

#### 4. CONCLUSÕES

De acordo com resultados obtidos neste trabalho pode-se concluir que:

- As variáveis profundidade de corte, avanço e classe da ferramenta foram estatisticamente significativas nos esforços de corte.
- Existem modelos distintos para os diferentes pares ferramenta/peça, sendo que neste trabalho foram testados os pares com a liga de titânio Ti-6Al-7Nb, com as ferramentas H13A e a ferramenta 3215, e os pares com a liga Ti-6Al-4V, com as ferramentas 3215 e H13A.
- Os menores valores de esforços de corte obtidos foi com a ferramenta H13A, já o tipo de liga não estatisticamente significativo nos esforços de corte.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG pelo apoio financeiro para a participação no CONEM 2018.

#### 6. REFERÊNCIAS

- ASM International, 1988, "Titanium: A Technical Guide", Materials Park, pp. 75-85.
- Barry, J., Byrne, G., Lennon, D., 2001, "Observations on chip formation and acoustic emission in machining Ti-6Al-4V alloy", International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol.4., pp. 1055-1070.
- Diniz, A. E.; Marcondes, F.C.; Coppini N. L., 1999, "Tecnologia da Usinagem dos Materiais", 1ª Edição, MM Editora, 242 p.

- Dorlin, T. ; Fromentin, G. ; Costes, J. “Generalised cutting force model including contact radius effect for turning operations on Ti6Al4V titanium alloy” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, Vol.86(9), pp.3297-3313.
- Guastaldi, A.C., 2003, “Engenharia de superfície do titânio para aplicações biomédicas, Metalurgia & Materiais”, Vol. 59, pp.442-444.
- Ferraresi, D., 1977, “Fundamentos da Usinagem dos Metais”, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 751 p.
- Jaffery, S.I.; Mativenga, P.T., “Assessment of the machinability of Ti-6Al-4V alloy using the wear map approach”, International Journal Advanced Manufacturing.
- Jagadeesh, T. ; Samuel, G.L., “Investigations into Cutting Forces and Surface Roughness in Micro Turning of Titanium Alloy Using Coated Carbide Tool” Procedia Materials Science, 2014, Vol.5, pp.2450-2457.
- Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B., 2009, “Teoria da Usinagem dos Materiais”, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 371 p.
- Nabil, K., Zahia, H., Yalles, M.A., Ouelaa, N., 2012, “Statistical Analysis of Surface Roughness by Design of Experiments in Hard Turning, Mechanika”, 18, pp. 605-6011.
- Trent, E. M., 2000, “Metal Cutting”, Butterworth-Heinemann, 4TH Ed. 446 p.
- Walker, J. R., 2004, “Machining Fundamentals”, 8ª edição, Goodheart-Willcox.
- Xie, J. ; Luo, M.J. ; Wu, K.K. ; Yang, L.F. ; Li, D.H. “Experimental study on cutting temperature and cutting force in dry turning of titanium alloy using a non-coated micro-grooved tool” International Journal of Machine Tools and Manufacture, October 2013, Vol.73, pp.25-36.

## 7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

# STATISTICAL MODELING OF CUTTING FORCES OF TURNING PIECES IN THE Ti-6Al-7Nb E TI-6Al-4V TITANIUM ALLOYS

Jéssica Tito Vieira, [jessica.tito@hotmail](mailto:jessica.tito@hotmail)<sup>1</sup>  
Amanda Oliveira Mello, [amandamello@live.com](mailto:amandamello@live.com)<sup>1</sup>  
Wasley Amaral Coelho, [wasleyamaral@hotmail.com](mailto:wasleyamaral@hotmail.com)<sup>1</sup>  
Samuel Alves de Freitas, [samuelengmec@gmail.com](mailto:samuelengmec@gmail.com)<sup>1</sup>  
Lincoln Cardoso Brandão, [lincoln@ufs.br](mailto:lincoln@ufs.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal University of São João del-Rei - Department of Mechanical Engineering, Praça Frei Orlando, 170 – Centro, São João del-Rei-MG, 36.307-352, Brazil

**Abstract.** Turning process is one the most applied machining process in several sectors of metalworking industry. And study the behavior and the order of magnitude of the cutting forces in the machining processes is very important because they influence the final energy spent in the process. Machined pieces in titanium alloys have been applied with success in several sectors such as; aeronautical and aerospace industry, automotive industry, navy industry, and biomedical engineering. This study analyzed, according to a response surface design, the influence of the input parameters cutting speed, depth o cut, and feed rate on the cutting forces of the workpieces of the Ti-6Al-4V and Ti-6Al-7Nb alloys. Workpieces with dimensions of 50 mm in diameter and 14 mm in length were turned in the turning-center and the cutting forces was monitored using a stationary piezoelectric dynamometer Kistler 9272. Through analysis of variance (ANOVA) the effects of the significant variables in the cutting forces were demonstrated, in which the depth of cut, the advance and the class of the tool were statistically significant in the responses analyzed.

**Keywords:** titanium, turning, surface roughness, cutting force.