

MODELAGEM ESTATÍSTICA DA RUGOSIDADE DE PEÇAS TORNEADAS NAS LIGAS DE TITÂNIO Ti-6Al-7Nb E Ti-6Al-4V

Amanda Oliveira Mello, amandamello@live.com¹

Carlos Henrique Lauro, caiquelauro@gmail.com¹

Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufsj.edu.br¹

Jessica Tito Vieira, jessica.tito@hotmail.com¹

¹Universidade 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. Os processos de fabricação têm sido associados à metrologia e ao controle estatístico visando à produção de peças de alta qualidade. Uma das formas de avaliar a qualidade é através da medição da rugosidade. 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 fatorial completo, a influência dos parâmetros velocidade de corte, profundidade de corte e avanço da ferramenta na rugosidade 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 a rugosidade foi medida utilizando um rugosímetro portátil. Os resultados mostraram que existe uma relação entre os parâmetros de corte e a rugosidade dos corpos de prova. Através da análise de variância foi possível notar que o aumento de qualquer um dos parâmetros de corte resulta em um aumento no valor da rugosidade.

Palavras-chave: titânio, torneamento, rugosidade, forças de corte.

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.

No torneamento a peça se movimenta em torno de um eixo fixo da máquina e, simultaneamente, em torno de seu próprio eixo, enquanto uma ou mais ferramentas cortantes auxiliam na fabricação da peça. O processo de torneamento consiste em movimentos associados a direções, sentidos, percursos e velocidades. As variações nesses parâmetros produzem peças das formas mais variadas possíveis, com geometrias simples ou complexas.

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 na qualidade das peças usinadas. A otimização destes parâmetros permitirá a fabricação de peças com maior qualidade e menores custos de produção.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. 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.

2.2. Fabricação de produtos com ligas de 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.

O desempenho das ferramentas de corte é altamente dependente das condições de corte, como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Estudos mostram que aumentar a velocidade de corte pode ajudar a maximizar a produtividade e, ao mesmo tempo, melhorar a qualidade da superfície das peças usinadas (EL-BARADIE, 1997).

Suhai *et al.* (2010) estudou a rugosidade e a temperatura da superfície para otimizar os parâmetros de corte. Da mesma forma, Singh *et al.* (2007) obteve uma configuração ótima dos parâmetros velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte, aumentando a vida das ferramentas. Ele descobriu que o avanço tem maior influência que a velocidade de corte e profundidade de corte na vida da ferramenta.

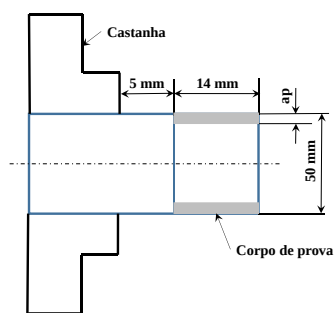
Thamizhmanii *et al.* (2007) também estudou a rugosidade da superfície de peças torneadas em ligas de aço. Ele concluiu que a profundidade de corte e o avanço são os parâmetros de maior influência na rugosidade, e a velocidade de corte é o de menor influência.

3. 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. (1a).



(a)



(b)

Figura 1: a) Centro de torneamento ROMI GL 240-M; b) esquema da fixação do corpo de prova na máquina (Fonte: autoria própria).

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 Tab. (1), foram definidos de acordo com informações do fabricante das ferramentas. As duas ligas de Titânio foram consideradas como parâmetros não controláveis.

Tabela 1: Parâmetros de entrada empregados no processo de torneamento (Fonte: autoria própria).

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 as rugosidades nos parâmetros Ra e Rz e os esforços de corte.

O *set-up* para medição das rugosidades Ra e Rz é mostrado na Fig. (2), sendo o rugosímetro configurado com comprimento de amostragem (*cut-off*) de 0,8 mm. Para medição dos esforços de corte foi utilizado um dinamômetro piezoelétrico e as respostas de força e rugosidade foram analisadas em um software estatístico específico.

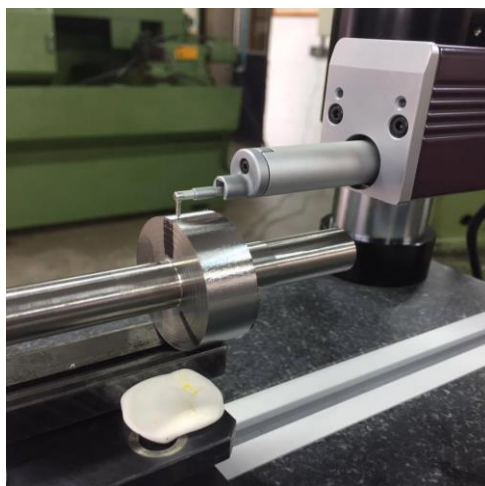


Figura 2: Set-up para medição de rugosidade (Fonte: autoria própria).

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Valores de Rugosidade nos parâmetros Ra e Rz

A Tabela (2) apresenta os resultados estatísticos demonstrando a influência dos parâmetros de entrada sobre as respostas Ra e Rz. O ajuste dos dados pode ser considerado como excelente para este experimento devido ao fato do R^2 ajustado ter ficado em uma faixa acima de 70%, com um valor de 84.45% para o parâmetro Ra e de 88.59% para o parâmetro Rz. Isto confirma que os valores estão dentro da normalidade e são coerentes, pois o valor de R^2 previsto foi de 77.93% para o parâmetro Ra e de 83.97% para o parâmetro Rz. Assim, como os parâmetros finais ficaram acima dos valores previstos, podemos afirmar que o modelo de superfície de resposta se ajustou aos dados de rugosidade.

Considerando os parâmetros velocidade de corte, profundidade de corte e avanço da ferramenta isoladamente, percebe-se que apenas a variação do avanço teve influência nas respostas de rugosidade, independente do parâmetro medido, pois, assim como acontece nos demais materiais metálicos, a variação do avanço está diretamente relacionada com a variação da rugosidade, o acabamento da peça e a qualidade superficial. Apesar do raio de ponta de cada

ferramenta ser constante, o valor da rugosidade máxima (R_z para norma e R_{MAX}), por exemplo, em processos de torneamento, está intimamente relacionado com o raio de ponta e o avanço e, normalmente, a variação dos valores dos demais parâmetros segue a mesma tendência. Assim, com a fixação do raio de ponta que está no denominador no modelo clássico de usinagem (para os valores de R_{MAX}), e com a variação do avanço que está no numerador, ocorre uma variação significativa nos valores de rugosidade. Isto tem uma tendência de se repetir nos demais parâmetros de rugosidade.

O mesmo fato ocorre para o modelo quadrático com os parâmetros multiplicados por si mesmos, pois apenas o avanço mostrou influência para desenvolvimento de um modelo quadrático. Os demais parâmetros de entrada, velocidade de corte e profundidade de corte, não tiveram seus P-valores abaixo de 5% e, portanto, não influenciaram nas rugosidades R_a e R_z . Por outro lado, apesar da comprovação estatística com os valores de R acima de 70%, observa-se na tabela que na interação entre “velocidade de corte vs. profundidade de corte” a resposta R_a foi sensível à variação destes parâmetros de entrada, demonstrando ser significativa devido ao resultado ser inferior a 5%.

Tabela 2: Resultados das respostas R_a e R_z (Fonte: autoria própria).

Fonte	Rugosidade R_a		Rugosidade R_z	
	F-Valor	P-Valor	F-Valor	P-Valor
Efeitos principais				
Velocidade de corte	<u>0.030</u>	0.863	<u>0.000</u>	0.999
Profundidade de corte	0.260	0.612	3.150	0.081
Avanço	404.220	<u>0.000</u>	576.980	<u>0.000</u>
Tipo de Liga	0.430	0.513	0.350	0.554
Classe da Ferramenta	8.740	<u>0.004</u>	6.590	<u>0.013</u>
Modelo quadrático				
Velocidade de corte vs. Velocidade de corte	1.160	0.287	0.000	0.957
Profundidade de corte vs. Profundidade de corte	0.660	0.420	0.130	0.717
Avanço vs. Avanço	22.690	<u>0.000</u>	35.180	<u>0.000</u>
Interação dois a dois				
Velocidade de corte vs. Profundidade de corte	4.560	<u>0.037</u>	0.880	0.352
Velocidade de corte vs. Avanço	1.900	0.173	3.170	<u>0.080</u>
Velocidade de corte vs. Tipo de Liga	2.050	0.158	1.250	0.268
Velocidade de corte vs. Classe da Ferramenta	0.900	0.346	0.370	0.546
Profundidade de corte vs. Avanço	0.100	0.750	1.300	0.259
Profundidade de corte vs. Tipo de Liga	0.010	0.940	0.300	0.589
Profundidade de corte vs. Classe da Ferramenta	0.010	0.930	0.430	0.516
Avanço vs. Tipo de Liga	0.100	0.748	0.410	0.523
Avanço vs. Classe da Ferramenta	0.340	0.559	0.710	0.404
Tipo de Liga vs. Classe da Ferramenta	0.000	0.979	0.100	0.747
Ajuste do modelo para R_a	S	R^2	$R^2(\text{Adj})$	$R^2(\text{prev.})$
Valor	0.547525	87.99%	84.45%	77.93%
Ajuste do modelo para R_z	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
Valor	2.00323	91.19%	88.59%	83.97%

As equações (1), (2), (3) e (4) mostram a modelagem matemática da resposta rugosidade no padrão R_a 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.

$$Ra_{(Ti-6Al-4V, H13A)} = 12,46 - 0,275v_c - 8,22a_p - 22,9f + 0,00138v_c^2 + 1,02a_p^2 + 95,9f^2 + 0,1102v_c \cdot a_p + 0,286v_c \cdot f + 2,07a_p \cdot f \text{ } [\mu m] \quad (1)$$

$$Ra_{(Ti-6Al-7Nb, H13A)} = 14,20 - 0,303v_c - 8,26a_p - 22,1f + 0,00138v_c^2 + 1,02a_p^2 + 95,9f^2 + 0,1102v_c \cdot a_p + 0,286v_c \cdot f + 2,07a_p \cdot f \text{ } [\mu m] \quad (2)$$

Nas equações (1) a (4), onde foi fixado o tipo de ferramenta (H13A) e variada a liga de titânio, observa-se que existe uma pequena variação de 14% entre os parâmetros constantes iniciais das funções. Além disso, pode-se

considerar que os parâmetros lineares dos modelos têm variações mínimas. O mesmo ocorre para os parâmetros quadráticos dos modelos e também para as interações entre os parâmetros de entrada. Neste caso as constantes são as mesmas para os quatro modelos. Entretanto, os modelos demonstram que os parâmetros de entrada velocidade de corte e profundidade de corte basicamente não têm influência nos modelos, fato comprovado com as suas constantes de multiplicação, que apresentaram valores também mínimos e 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.

$$Ra_{(Ti-6Al-4V, 3215)} = 11,91 - 0,257v_c - 8,27a_p - 24,3f + 0,00138v_c^2 + 1,02a_p^2 + 95,9f^2 + 0,1102v_c*a_p + 0,286v_c*f + 2,07a_p*f [\mu m] \quad (3)$$

$$Ra_{(Ti-6Al-7Nb, 3215)} = 13,65 - 0,285v_c - 8,32a_p - 23,5f + 0,00138v_c^2 + 1,02a_p^2 + 95,9f^2 + 0,1102v_c*a_p + 0,286v_c*f + 2,07a_p*f [\mu m] \quad (4)$$

A Figura (3) mostra o gráfico bidimensional para a evolução do valor da rugosidade Ra com o aumento simultâneo de todos os parâmetros de entrada. Observa-se que, antes de ocorrer uma subida assintótica do gráfico, existe um ponto de mínimo situado entre os pontos de medição 6 e 8. Porém, como o gráfico mostra, o menor valor de rugosidade Ra = 1,05 μm ocorreu para o modelo da eq. (1), e o maior valor de rugosidade Ra = 1,58 μm ocorreu para o modelo da eq. (4). Dessa forma, nota-se que a ferramenta H13A proporciona junto com a liga Ti-6Al-4V a maior qualidade no torneamento. Observa-se que a diferença dos valores de rugosidade é aproximadamente de 50%.

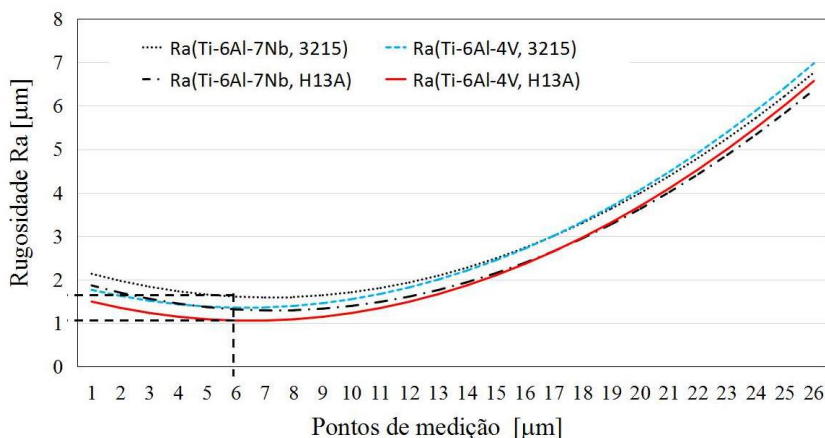


Figura 3: Gráficos de Rugosidade Ra de acordo com os modelos matemáticos 1 a 4 (Fonte: autoria própria).

As equações de (5) a (8) mostram os modelos matemáticos para a predição dos valores de rugosidade Rz. Observa-se que, assim como aconteceu com os modelos matemáticos para a rugosidade Ra, apenas para as constantes do modelo e para os valores lineares existem diferenças significativas de aproximadamente 37% (entre as constantes de 19,3 e 26,6) e de 19% (entre os valores lineares de 16,5 e 13,8).

$$Rz_{(Ti-6Al-4V, H13A)} = 22,7 - 0,258v_c - 16,5a_p - 130,4f + 0,00026v_c^2 + 1,68a_p^2 + 436,7f^2 + 0,177v_c*a_p + 1,350v_c*f + 27,0a_p*f [\mu m] \quad (5)$$

$$Rz_{(Ti-6Al-7Nb, H13A)} = 26,6 - 0,338v_c - 15,3a_p - 124,6f + 0,00026v_c^2 + 1,68a_p^2 + 436,7f^2 + 0,177v_c*a_p + 1,35v_c*f + 27,0a_p*f [\mu m] \quad (6)$$

Basicamente, pode-se observar que os máximos e os mínimos dos modelos, fixando-se as ferramentas e variando-se as ligas de titânio, apresentam o valor de máximo e o valor de mínimo em faixas de valores diferentes, porém com a mesma variação de 17% para ambos os valores. Da mesma forma, para as constantes lineares a variação foi de 8%, aproximadamente.

$$Rz_{(Ti-6Al-4V, 3215)} = 19,3 - 0,215v_c - 15,0a_p - 122,8f + 0,00026v_c^2 + 1,68a_p^2 + 436,7f^2 + 0,177v_c*a_p + 1,35v_c*f + 27,0a_p*f [\mu m] \quad (7)$$

$$Rz_{(Ti-6Al-7Nb, 3215)} = 22,8 - 0,295v_c - 13,8a_p - 117,0f + 0,00026v_c^2 + 1,68a_p^2 + 436,7f^2 + 0,177v_c*a_p + 1,35v_c*f + 27,0a_p*f [\mu m] \quad (8)$$

A Figura (4) apresenta o comportamento da rugosidade Rz quando são variados todos os parâmetros de entrada simultaneamente, considerando um aumento da velocidade de corte, profundidade de corte e avanço. Nota-se que, assim como aconteceu com a rugosidade Ra, para rugosidade Rz existe um ponto de mínimo situado aproximadamente entre o quinto e o sexto ponto de medição de rugosidade. Os valores foram muito próximos, independente do par ferramenta/liga de titânio testado. O valor mínimo de rugosidade ficou entre 6,34 μm (para a liga Ti-6Al-7Nb com a ferramenta 3215) e 6,80 μm (para a liga Ti-6Al-4V com ferramenta H13A), apresentando uma variação de 7% de forma geral.

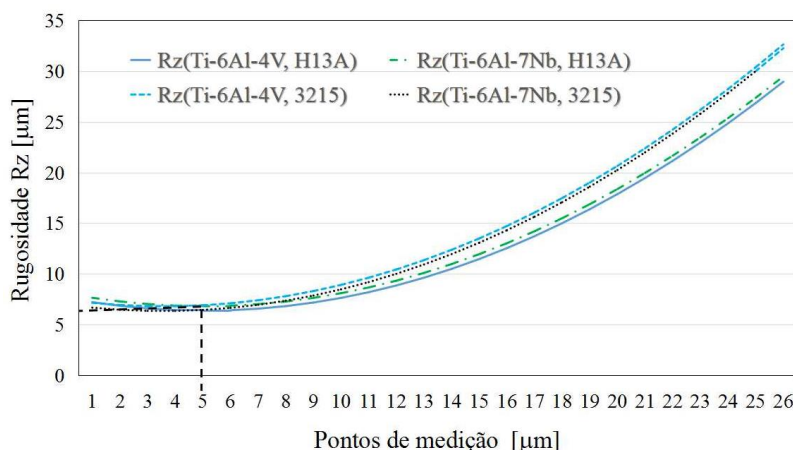


Figura 4: Gráficos de Rugosidade Rz de acordo com os modelos matemáticos 5 a 8 (Fonte: autoria própria).

Conforme as informações apresentadas nas Figuras (3) e (4), nota-se que os valores mínimos de rugosidade Ra e Rz foram considerados quando ocorre uma elevação simultânea dos parâmetros de entrada velocidade de corte, profundidade de corte e avanço. Sabe-se que valores mínimos de avanço proporcionam menores valores de rugosidade, porém em alguns aspectos no processo de torneamento pode ocorrer um efeito denominado aração (*ploughing effect*). Esse efeito ocorre quando o cisalhamento atua em dimensão de microescala do material, que pode ser considerado mais como um corte imperfeito do que um corte com cisalhamento e recalçamento preciso do material, devido aos baixos valores de avanço e profundidade de corte. Portanto, nem sempre é aconselhável usar os menores valores de avanço.

Segundo os modelos propostos pode-se definir que, caso fossem usados o menor valor de avanço de 0,05 mm/rev junto com os valores máximos de velocidade de corte de 75 m/min e profundidade de corte de 1 mm, seriam obtidos valores de rugosidade Ra entre 3,64 μm (para a liga Ti-6Al-7Nb com a ferramenta H13A) e 6,46 μm (para a liga Ti-6Al-4V com ferramenta H13A). Porém, além do efeito explicado anteriormente com a diminuição do avanço, ainda aconteceria o aumento da velocidade de corte, gerando um aumento da produtividade. Mas, em contrapartida, haveria um aumento do desgaste da ferramenta. Assim, a escolha dos menores parâmetros em processos de torneamento, que nem sempre serão os menores ou maiores para os parâmetros de entrada, visa um equilíbrio na definição dos três principais parâmetros do processo, com objetivo principal de melhoria da qualidade superficial, como foi estudado neste trabalho.

5. CONCLUSÕES

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

- ✓ 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 modelos matemáticos apresentaram a mesma tendência para os parâmetros de rugosidade Ra e Rz;
- ✓ Obteve-se uma faixa de valores entre 1,05 μm e 1,58 μm para o parâmetro Ra e uma faixa de valores entre 6,34 μm e 6,80 μm para o parâmetro Rz;
- ✓ Os melhores valores de Rugosidade Ra foram obtidos com a liga Ti-6Al-4V com a ferramenta H13A. Por outro lado, os piores valores foram obtidos com a liga Ti-6Al-7Nb com a ferramenta 3215;
- ✓ Os melhores valores de Rugosidade Rz foram obtidos com a liga Ti-6Al-7Nb com a ferramenta 3215. Por outro lado, os piores valores foram obtidos com a liga Ti-6Al-7Nb com a ferramenta 3215.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG pelo financiamento do Projeto APQ-01987-14 e pelo apoio financeiro para a participação no COBEF 2017.

7. 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., Marcondes, F., Coppini, N., 2013, "Tecnologia da Usinagem Dos Materiais", 8ª edição, Artliber.
- El-Baradie, M. A., Choudhury, A., 1997, "Surface roughness prediction in the turning of high-strength steel by factorial design of experiments", Journal of Materials Processing Technology, 67, pp. 55-61.
- Guastaldi, A.C., 2003, "Engenharia de superfície do titânio para aplicações biomédicas, Metalurgia & Materiais", Vol. 59, pp.442-444.
- Jaffery, S.I.; Mativenga, P.T., "Assessment of the machinability of Ti-6Al-4V alloy using the wear map approach", International Journal Advanced Manufacturing
- 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.
- Singh, D., Rao, P. V., 2007, "A surface roughness prediction model for hard turning process", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 32, pp. 1115-1124.
- Suhail, A., Ismail, N., Wong, S., Voon, J., Nurul, S. A., 2010, "Optimization of Cutting Parameters Based on Surface Roughness and Assistance of Workpiece Surface Temperature in Turning Process", American Journal of Engineering and Applied Sciences, 3, pp. 102-108.
- Thamizhmanii, S., Saparudin, S., Hasan, S., 2007, "Analysis of Surface Roughness by Using Taguchi Method", Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 20, pp. 503-505.
- Trent, E. M., 2000, "Metal Cutting", Butterworth-Heinemann, 4TH Ed. 446 p.
- Walker, J. R., 2004, "Machining Fundamentals", 8ª edição, Goodheart-Willcox.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STATISTICAL MODELING OF SURFACE ROUGHNESS OF TURNING PIECES IN THE Ti-6Al-7Nb E TI-6Al-4V TITANIUM ALLOYS

Amanda Oliveira Mello, amandamello@live.com¹
Carlos Henrique Lauro, caiquelauro@gmail.com¹
Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufsj.edu.br¹
Jessica Tito Vieira, jessica.tito@hotmail.com¹

¹Federal University of São João del-Rei – Department of Mechanical Engineering, Praça Frei Orlando, 170 – Centro, São João del-Rei-MG, 36.307-352, Brasil.

Abstract: Turning process is one the most applied machining process in several sectors of metalworking industry. The machining processes have been linked to metrology science and to the statistical control aiming the high quality workpieces. One of the ways to evaluate quality is by measuring the surface roughness. Machined pieces in titanium alloys have been applied with success in several sectors such as; aeronautical and aerospace industry, automotive industry, navy industry, and bio-medical engineering. This study analyzed, according to a complete design of experiments, the influence of the input parameters cutting speed, depth o cut, and feed rate on the surface roughness 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 surface roughness was measured using a portable surf tester. The results showed that is a relationship between the input parameters and surface roughness of the workpieces. The analysis of variance showed that the increase of each input parameter provide a proportional increase in the surface roughness values.

Key-words: titanium, turning, surface roughness, cutting force.