

ANÁLISE DO TORNEAMENTO DE INCONEL 625 POR MEIO DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Daniel Iwao Suyama, disuyama@yahoo.com.br¹

Diego de Medeiros Barbosa, diegombarbosa@gmail.com²

Aristides Magri, arimagri@fem.unicamp.br³

Anselmo Eduardo Diniz, anselmo@fem.unicamp.br³

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Campus de Itaquaquecetuba, Rua Primeiro de Maio, SN, Estação, CEP 08571-050, Itaquaquecetuba - SP

²Centro Universitário Hermínio Ometto, Av. Dr. Maximiliano Baruto, 500, Araras, SP.

³Universidade Estadual de Campinas, R. Mendeleyev, 200, Campinas, SP.

Resumo: Superligas são ligas resistentes ao calor e podem ser à base de níquel, ferro-níquel ou cobalto, titânio e apresentam uma boa combinação de resistência à degradação superficial, resistência mecânica, resistência ao desgaste e degradação química e baixa condutividade térmica. Por isso tais ligas são amplamente utilizadas no setor aeronáutico e de óleo e gás. No entanto, estas mesmas características fazem com que a usinabilidade seja baixa quando comparadas com outros metais. Deste modo, o objetivo deste trabalho é otimizar o torneamento do Inconel 625 por meio de planejamento experimental. Velocidade de corte (60 e 80 m/min), avanço (0,08 e 0,16 mm/rev) e estratégia de usinagem (corte longitudinal e corte cônico) foram aplicados em uma matriz fatorial completa. Acabamento superficial e a vida da ferramenta foram as saídas avaliadas. Os resultados obtidos indicam que a utilização do corte cônico como estratégia de usinagem não influencia a vida da ferramenta ou o acabamento. Assim, o corte longitudinal (mais produtivo por demandar menor quantidade de passes) é recomendado para o torneamento. O avanço é o principal fator de influência na rugosidade (quanto menor, melhor o acabamento) e a velocidade de corte influencia somente a vida da ferramenta. Portanto, a análise da influência dos fatores indica que o planejamento experimental é uma ferramenta estatística útil para a melhoria dos processos.

Palavras-chave: Níquel, Corte Cônico, Design de Experimentos, Desgaste, ANOVA.

1. INTRODUÇÃO

As ligas à base de níquel possuem excelentes propriedades termomecânicas como, por exemplo: boa resistência à degradação superficial, resistência mecânica, resistência ao desgaste, baixa condutividade térmica, boa relação resistência mecânica-peso. Devido a essas características, elas são amplamente utilizadas na indústria aeroespacial, em equipamentos para tratamento térmico, indústrias químicas e petroquímicas, usinas termoeletrônicas e nucleares (Ramanujam et al., 2014; Maurotto et al., 2012; Özgüm et al., 2013; Diniz, Marcondes e Coppini, 2013).

Estas ligas apresentam alta taxa de encruamento, alta resistência mecânica em elevadas temperaturas, alta ductilidade, boa resistência à corrosão e baixa estabilidade química em relação aos principais materiais de ferramenta. Por isso são desenvolvidas elevadas forças de corte e temperaturas em torno da aresta de corte, causando deformação plástica, desgaste acelerado da ferramenta (Ramanujam et al., 2014; Maurotto et al., 2012), extrema propensão para soldar o cavaco na ferramenta criando a aresta postiça de corte (Mall, Kumar e Singh, 2014; Machado et al., 2011).

O comportamento apresentado na usinagem faz com que as ligas de níquel sejam classificadas como um material de difícil usinagem. Assim, são utilizados parâmetros de usinagem considerados baixos (velocidade de corte, profundidade de usinagem e avanço) e isto implica em uma baixa taxa de remoção de cavaco. As ferramentas devem possuir estabilidade química em altas temperaturas, dureza a quente, tenacidade e elevada resistência ao desgaste (Magri, 2015; Maurotto et al., 2012). Severos desgastes de flanco e de entalhe são os principais tipos de desgaste encontrados na usinagem das ligas de níquel, fazendo com que a vida da ferramenta seja reduzida e que qualquer ação para sua melhoria seja bem vinda (Therezani, Hassui e Suyama, 2013).

2. MATERIAIS E METODOLOGIA

O torneamento da superliga à base de níquel foi realizado no Laboratório de Usinagem dos Materiais do Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, em um torno CNC ROMI Galaxy 20, com comando numérico GE-Fanuc, potência do motor de 15 kW e rotação máxima do eixo árvore de 4500 RPM.

O material utilizado neste trabalho foi a superliga de níquel Inconel 625, com dureza de 238 HV, e sua composição pode ser observada na Tab. (1).

Tabela 1 – Composição química da liga Inconel 625 (% em peso).

Ni	Cr	Mo	Si	Mn	Fe	Nb+Ta	Ti	Al	Co
51,4	35	8,8	0,001	0,02	0,8	3,64	0,177	0,171	0,025

Os corpos de prova utilizados nos ensaios possuíam formato cilíndrico e dimensões apresentadas na Fig. (1). Os cortes foram feitos em passadas longitudinais ou cônicas. A região à esquerda era a parte do corpo de prova fixada nas castanhas.

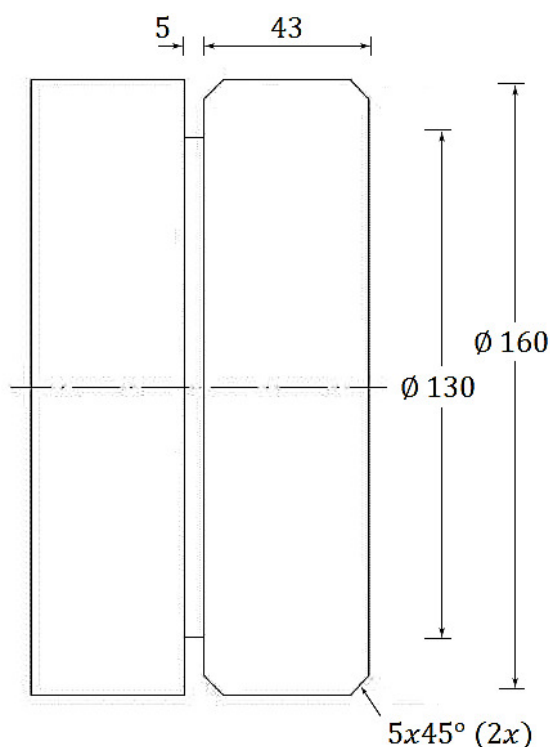


Figura 1. Esquema do corpo de prova em Inconel 625 .

Foram feitos chanfros na peça com a finalidade de suavizar o contato tanto na entrada quanto na saída da ferramenta. Assim, a espessura de corte ia variando gradativamente até atingir seu valor máximo (na entrada do corte) ou mínimo (na saída do corte).

A ferramenta utilizada neste trabalho foi o inserto CNMG 12 04 04, classe GC1115 e suporte PCLNR 2525 M12, pertencentes à Sandvik Coromant. A classe GC1115 corresponde à ISO S20 (S15-S25), adequada para torneamento médio e desbaste de superligas resistentes ao calor, é um metal duro de grãos finos com cobertura PVD (*Physical Vapor Deposition*).

Foram escolhidos três parâmetros para serem estudados: velocidade de corte, avanço e estratégia de usinagem. A Tab. (2) a seguir apresenta as variáveis de entrada utilizadas neste trabalho.

Tabela 2 – Variáveis de entrada.

Fatores	Limite inferior	Limite superior
Velocidade de corte (v_c) [m/min]	60	80
Avanço (f) [mm/rev]	0,08	0,16
Estratégia de usinagem	corte longitudinal	corte cônico

Uma matriz experimental fatorial completa foi definida contendo três fatores em dois níveis de variação (2^3) formando oito combinações possíveis. Cada condição foi replicada uma vez para se estimar o erro experimental de acordo com a Tab. (3) a seguir.

Tabela 3 – Matriz experimental completa utilizada no trabalho

Condição	Fatores		
	v_c [m/min]	f [mm/rev]	Estratégia
V60F08L	60	0,08	longitudinal
V80F08L	80	0,08	longitudinal
V60F16L	60	0,16	longitudinal
V80F16L	80	0,16	longitudinal
V60F08C	60	0,08	cônico
V80F08C	80	0,08	cônico
V60F16C	60	0,16	cônico
V80F16C	80	0,16	cônico

O limite inferior da velocidade de corte e o limite inferior e superior do avanço da ferramenta foram escolhidos de acordo com valores recomendados em catálogos da fabricante para torneamento de ligas HRSA (*High Resistance Super Alloys*). A estratégia de usinagem com corte cônico ou rampa tem a finalidade de amenizar o desgaste por entalhe durante o processo de usinagem, espalhando o desgaste ao longo da aresta de corte da ferramenta.

No corte cônico (Fig. (2)) há a necessidade de dois passes para alcançar o diâmetro final. Por isso, o limite superior do intervalo do avanço foi o dobro do limite inferior, de modo que, no corte cônico, o tempo de corte quando se utilizava o maior valor do avanço fosse o mesmo daquele obtido quando se teve corte longitudinal e o menor avanço.

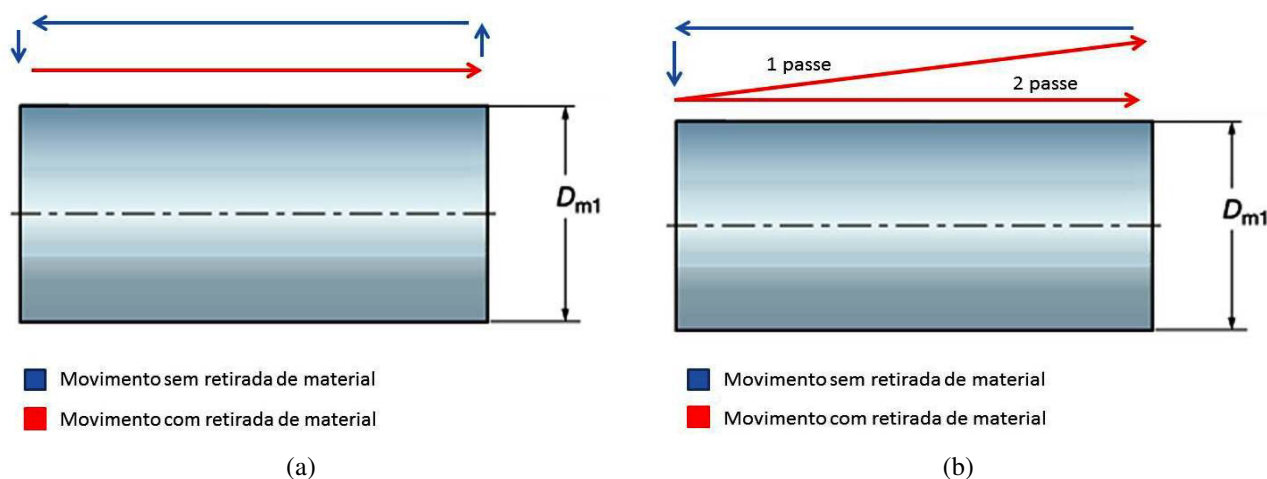


Figura 2. Estratégias de usinagem. (a) Corte longitudinal. (b) Corte cônico ou em rampa.

O limite superior da velocidade de corte (v_c) foi escolhido por meio de pré-testes, de modo que a vida da ferramenta se aproximasse de 15 minutos de corte, o que é considerada uma vida de ferramenta economicamente aceitável.

Para este trabalho foi adotado como critério de fim de vida da ferramenta o desgaste de flanco $V_B = 0,2$ mm ou um tempo máximo de torneamento de 15 minutos, pois havia restrição quanto à quantidade de material.

Em cada ensaio a ferramenta executava passes na peça retirando 0,5 mm de profundidade do material até que um dos critérios de vida pré-estabelecidos fosse atingido. No final de cada passe, a ferramenta era retirada do torno CNC e em seguida levada até o microscópio óptico para análise do desgaste.

Com o auxílio de uma câmera acoplada no microscópio Quimis, a superfície de folga da ferramenta foi fotografada e o desgaste medido com o auxílio do software Motic Images Plus.

Utilizando o rugosímetro, eram obtidos dados como o desvio aritmético médio do perfil (R_a) e a altura máxima do perfil (R_z). Foram realizadas três medidas de rugosidade a cada passe na peça a aproximadamente 120° entre elas.

As medições realizadas no microscópio e no rugosímetro eram repetidas ao término de cada passe que a ferramenta realizava na peça. Em seguida, era fixada novamente no torno e o todo processo era repetido.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro resultado analisado foi a quantidade de material removido em cada condição de usinagem e são apresentados na Fig. (3).

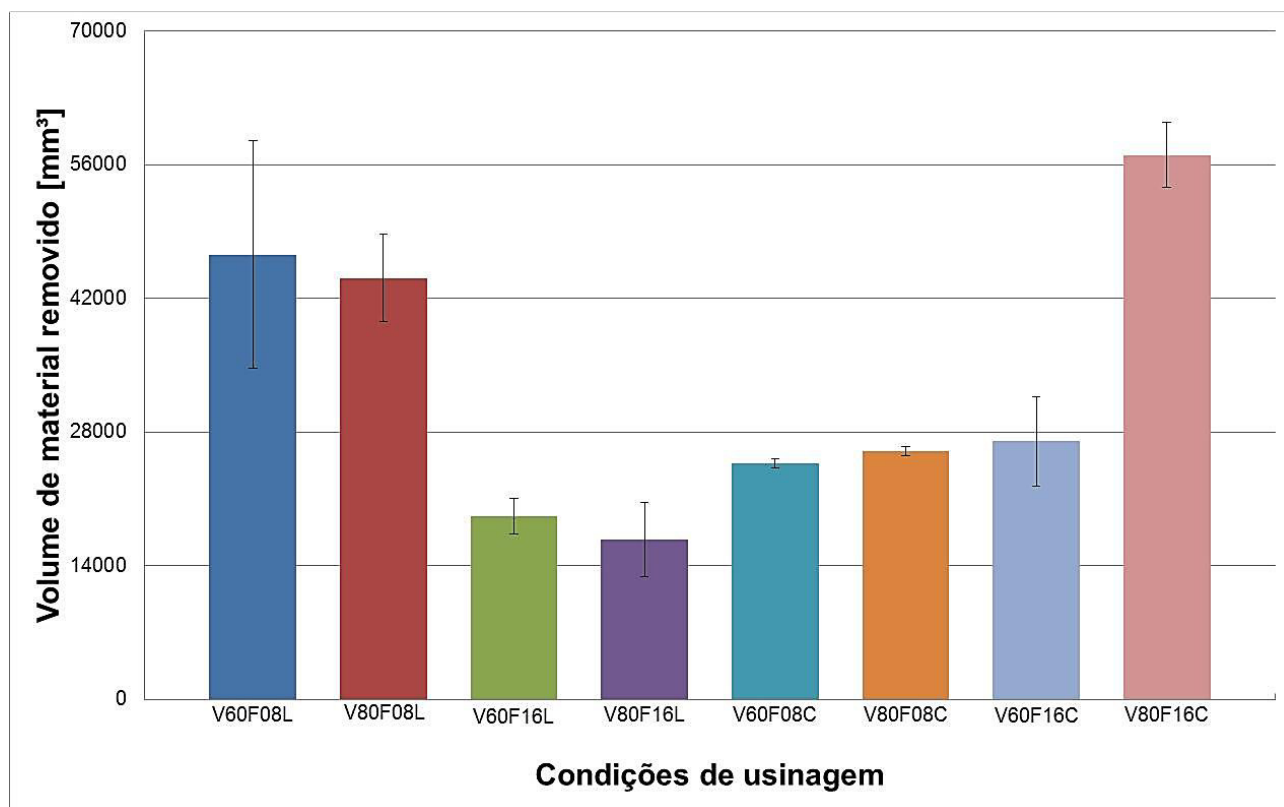


Figura 3. Volume de material removido.

Uma vez que havia restrição de material, algumas condições tiveram os ensaios interrompidos quando o tempo de corte se tornou superior a 15 minutos de corte. Estas condições foram: V60F08C e V80F08C. As demais condições tiveram fim de vida observado quando o desgaste de flanco atingiu $V_B = 0,2$ mm. O volume de cavaco removido pelas condições V60F08C e V80F08C são aproximadamente metade dos volumes removidos pelas condições V60F08L e V80F08L, pois a estratégia de corte cônico exige o dobro de tempo para a mesma remoção de material. Isto é um indicativo de que a estratégia de usinagem tem pouca influência sobre a vida da ferramenta.

Foi realizada a Análise de Variância (ANOVA) sobre os resultados obtidos com base no planejamento experimental e os dados são apresentados na Tab.(4). Os mesmos foram realizados considerando-se confiabilidade de 95%.

Tabela 4 – ANOVA para Volume de Material Removido.

Fator	Graus de Liberdade	F	P
Velocidade de Corte	1	0,19	0,670
Avanço	1	0,07	0,789
Estratégia de usinagem	1	0,01	0,931
Erro	12		
Total	15		

De acordo com a ANOVA, nenhum dos fatores pode ser considerado influente sobre o volume de material removido pois os valores da probabilidade P são maiores do que o nível de significância de 0,05. O comportamento qualitativo dos fatores é apresentado na Fig. (4). Nela, a inclinação da reta fornece indícios do efeito de cada fator sobre a resposta.

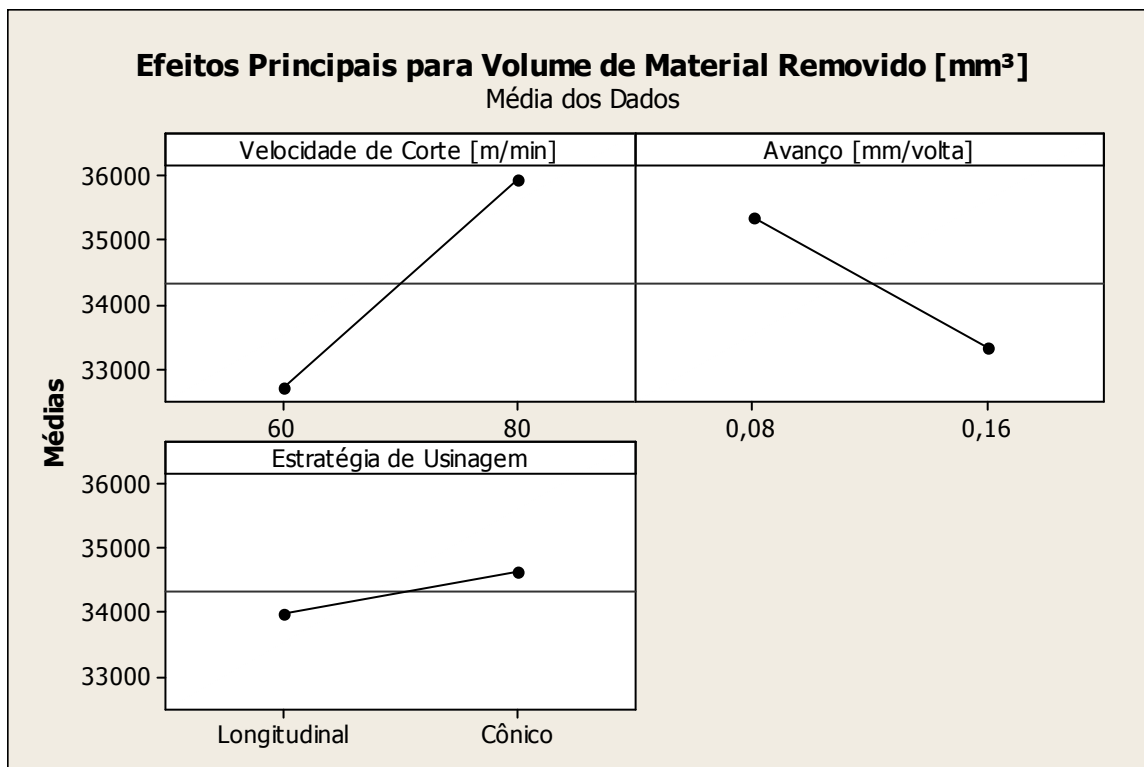


Figura 4. Efeitos principais sobre volume de material removido para cada um dos fatores observados.

Observa-se que a adoção de estratégia de corte longitudinal ou cônico não possui influência sobre a vida da ferramenta. Isto é um indicativo de que o desgaste de entalhe não foi o tipo de desgaste predominante. Se este desgaste fosse predominante, o corte longitudinal teria levado à vidas de ferramenta mais curtas, já que o corte cônico evita a formação deste tipo de desgaste. Visando a produtividade, o corte longitudinal seria o mais recomendado, pois demanda menor número de passes para usinagem de mesmo volume de material.

O papel da velocidade de corte e do avanço é contrário ao observado na literatura no qual o aumento da velocidade de corte causa diminuição da vida da ferramenta. Esta divergência se dá por uma característica da liga de níquel que é a alta taxa de encruamento.

A velocidade de corte mais alta aliada ao menor avanço tende a favorecer o cisalhamento em detrimento às deformações elásticas e plásticas, reduzindo o encruamento do material e tornando-o mais fácil de ser usinado. Este comportamento também foi observado Pawade, Joshi e Brahmanekar (2008).

Na usinagem, a resposta mais imediata e visível sobre as condições de corte é o acabamento da peça. A Fig. (5) mostra os resultados da rugosidade média obtida no início da vida da ferramenta.

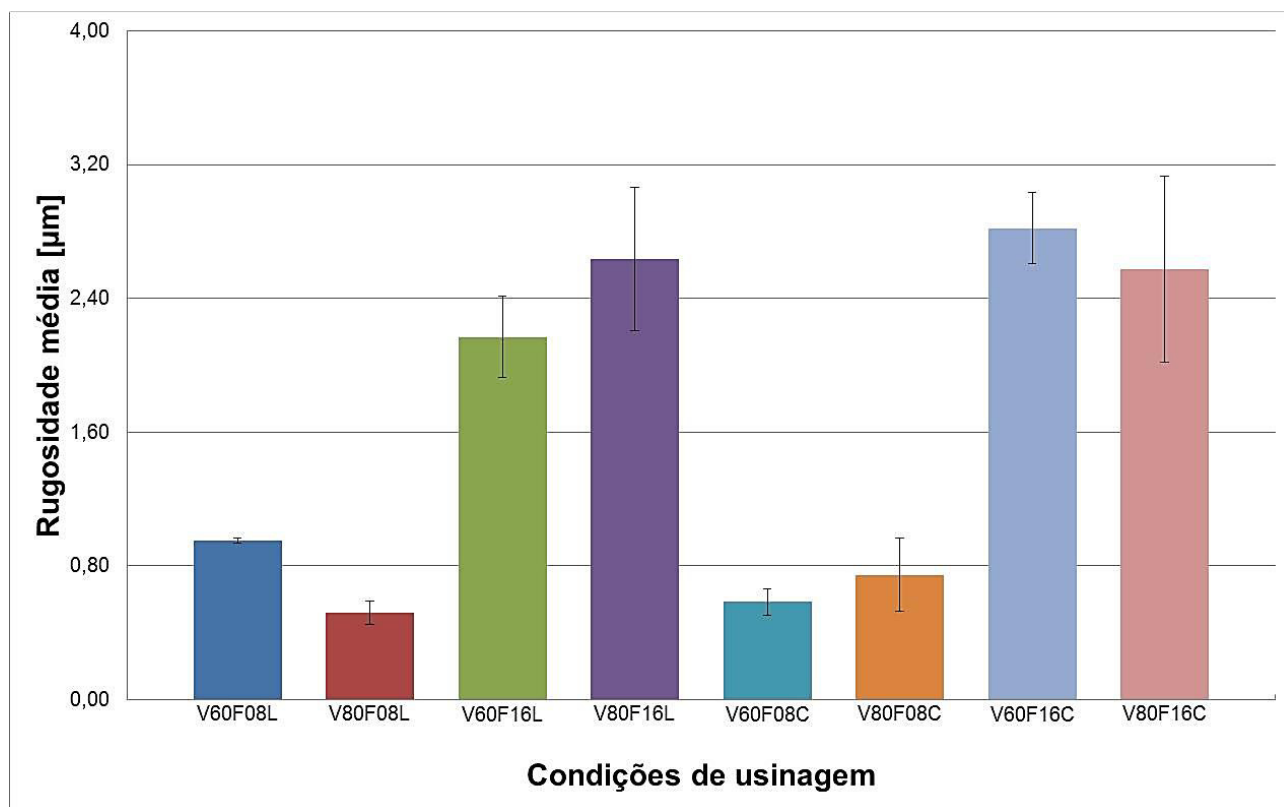


Figura 5. Rugosidade Média (Ra) obtida em início de vida da ferramenta.

As observações sobre o acabamento da peça são feitas considerando-se início de vida da ferramenta, pois o estado da ponta da ferramenta influencia diretamente sobre ela.

A rugosidade, do ponto de vista geométrico, é influenciada pelo raio de ponta da ferramenta e também pelo avanço. A Fig. (5) confirma que apenas o avanço (dentre os demais fatores analisados) promove mudanças na rugosidade. Os valores de rugosidade média obtidos são comuns às operações de torneamento.

A ANOVA foi novamente realizada sobre os resultados obtidos com base no planejamento experimental e os dados são apresentados na Tab.(5). Os mesmos foram realizados considerando-se confiabilidade de 95%.

Tabela 5 – ANOVA para Rugosidade Média.

Fator	Graus de Liberdade	F	P
Velocidade de Corte	1	0,01	0,940
Avanço	1	128,39	0,000
Estratégia de usinagem	1	0,47	0,504
Erro	12		
Total	15		

De acordo com a ANOVA, somente o avanço pode ser considerado influente sobre a rugosidade média pois é o único que apresenta valor de probabilidade P menor que o nível de significância de 0,05. O comportamento qualitativo dos fatores é apresentado na Fig. (6). Nela, a inclinação da reta fornece indícios do efeito de cada fator sobre a resposta.

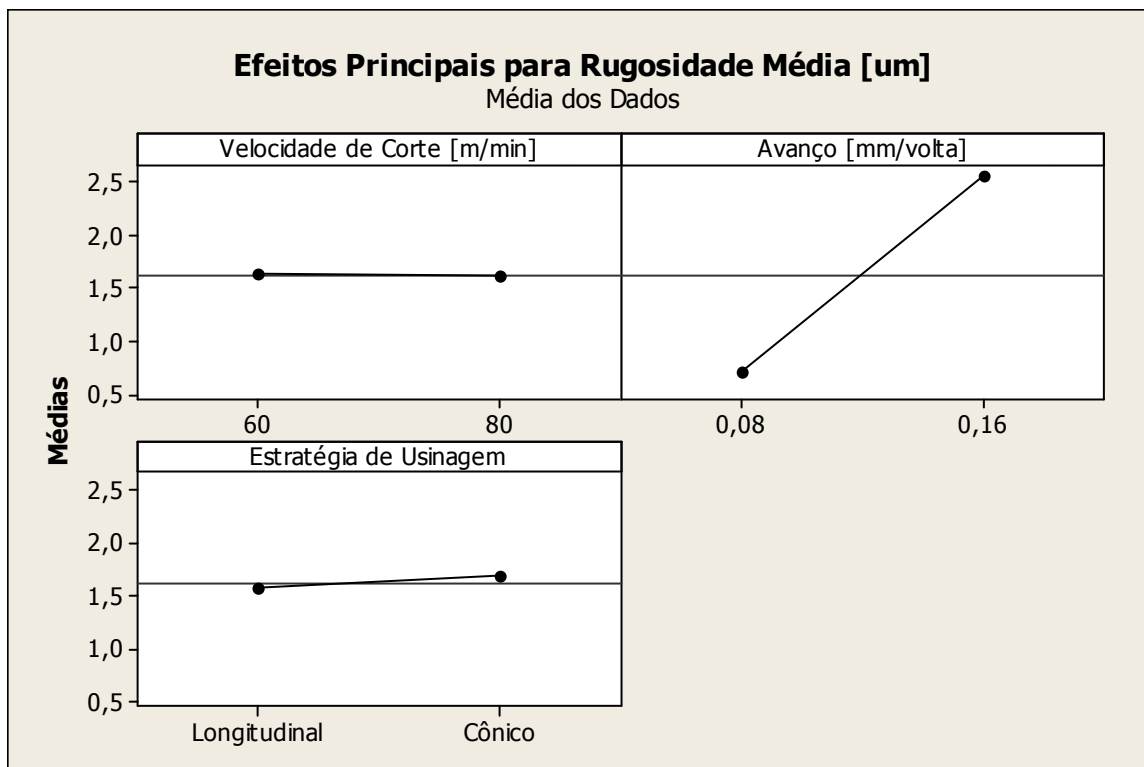


Figura 6. Efeitos principais sobre rugosidade média para cada um dos fatores observados.

Com base na Fig. (6), tanto a estratégia de usinagem quanto a velocidade de corte utilizada não influenciam no acabamento superficial. Isto é um indicativo que a operação de torneamento é estável (variações da estratégia de usinagem poderiam levar às vibrações) e que a ferramenta não é afetada pelo aumento de temperatura (ocasionado pelo aumento da velocidade de corte).

4. CONCLUSÕES

O objetivo de um planejamento experimental é auxiliar a conduzir experimentos e analisar os resultados obtidos a partir destes de forma que as conclusões alcançadas sejam válidas e objetivas. Portanto, com base nos resultados obtidos no torneamento externo da liga de níquel 625 (nas condições analisadas), é possível concluir que:

- O planejamento experimental é uma ferramenta que pode auxiliar na escolha de condições de usinagem otimizadas;
- A adoção do corte cônico não trouxe vantagens à usinagem;
- Velocidades de corte relativamente elevadas podem aumentar a vida da ferramenta na usinagem de ligas de níquel;
- O acabamento superficial está sujeito principalmente a um componente geométrico, dependente das características da ferramenta.

A ANOVA indicou que a usinagem de ligas de níquel podem ser otimizadas utilizando-se velocidades de corte relativamente elevada (80 m/min), corte longitudinal (menor tempo para mesma remoção de material) e avanço de acordo com a necessidade de acabamento.

Um DOE aliado à uma análise estatística permite avaliar a influência de cada um dos fatores de entrada de forma isolada, bem como suas interações. A importância do planejamento de experimentos ganha destaque quando se é necessário avaliar um sistema composto de diversos fatores e em diversos níveis, utilizando-se de um rol de experimentos enxuto.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Usinagem dos Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP (FEM/UNICAMP) e ao Centro Universitário Hermínio Ometto (FHO - Uniararas).

6. REFERÊNCIAS

- Diniz, A.E., MARCONDES, F.C., COPPINI, N.L., 2013, “Tecnologia de usinagem dos materiais”, Ed. Artliber, São Paulo, Brazil, 270 p.
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T., Silva, M.B., 2011, “Teoria da usinagem dos materiais”, Ed. Blucher, São Paulo, Brazil, 400 p.
- Magri, A., 2015, “Uma contribuição ao estudo do torneamento da liga 625 à base de níquel”, MSc. thesis, University of Campinas, Campinas, Brazil.
- Mall, V.K., Kumar, P., Singh, B., 2014, “A review of optimization of surface roughness of Inconel 718 in end milling using Tagushi Method”, International Journal of Engineering Research Applications, Vol. 4, n. 12, pp.103-109.
- Maurotto, A., Muhammad, A.R., Babitsky, V.I., Silberschmidt, V.V., 2012, “Comparing machinability of Ti-15-3-3-3 and Ni-625 alloys in UAT”, Procedia CIRP, n.1, pp. 330-335.
- Özgün, Ö., Gülsoy, H.Ö., Yilmaz, R., Findik, F., 2013, “Injection molding of nickel based 625 superalloy: sintering, heat treatment, microstructure and mechanical properties”, Journal of Alloys and Compounds, n.546, pp.192-207.
- Pawade, R.S., Joshi, S.S., Brahmankar, P.K., 2008, “Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high-speed turned Inconel 718”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, n. 48, pp. 15-28.
- Ramanujam, R., Venkatesan, K., Saxena, V., Pandey, R., Harsha, T., Kumar, G., 2014, “Optimization of machining parameters using Fuzzy based principal component Analysis during dry turning operation of Inconel 625 – A hybrid approach”, Procedia Engineering, Vol. 97, pp. 668-676.
- Therezani, D.F., Hassui, A., Suyama, D.I., 2013, “Avaliação de ferramentas de metal duro no torneamento da liga Inconel 713C”, Proceedings of the 7th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Vol. 1, Rio de Janeiro, Brazil.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

TURNING OF INCONEL 625 ALLOY USING DESIGN OF EXPERIMENTS

Daniel Iwao Suyama, disuyama@yahoo.com.br¹

Diego de Medeiros Barbosa, diegombarbosa@gmail.com²

Aristides Magri, arimagri@fem.unicamp.br³

Anselmo Eduardo Diniz, anselmo@fem.unicamp.br³

¹ National Institute of Education, Science, and Technology of São Paulo (IFSP), Campus of Itaquaquecetuba, Primeiro de Maio St, Estação, CEP 08571-050, Itaquaquecetuba - SP.

² Centro Universitário Hermínio Ometto, Dr. Maximiliano Baruto Av., 500, Araras, SP.

³ University of Campinas, Mendeleyev St, 200, Campinas, SP.

Abstract: Superalloys are heat-resistant alloys, and may be nickel, iron-nickel or cobalt-titanium based alloys. They exhibit a good combination of surface degradation resistance, mechanical strength, wear resistance and chemical degradation and low thermal conductivity. That is why such alloys are widely used in the aeronautical and oil and gas sectors. However, these same characteristics make the machinability low when compared to other metals. The objective of this work is to optimize the turning of the Inconel 625 by means of experimental planning. Cutting speed (60 and 80 m/min), feed (0.08 and 0.16 mm/rev) and machining strategy (longitudinal turning and taper turning) were applied in a full factorial matrix. Surface finishing and tool life were evaluated outputs. The obtained results indicate that the use of the taper turning as a machining strategy does not influence the tool life or the finish. Thus, longitudinal turning (that is more productive by requiring fewer passes) is recommended. The feed is the main influence factor in the surface roughness (the smaller, the better the finish) and the cutting speed influences only the life of the tool. Therefore, the analysis of the influence of the factors indicates that the experimental planning is a useful statistical tool for the improvement of the processes.

Keywords: Nickel, Taper Turning, Design of Experiments, Wear, ANOVA.