

ANÁLISE DO DESGASTE DA FERRAMENTA NO TORNEAMENTO DA LIGA INCONEL 625

Diego de Medeiros Barbosa, diegombarbosa@gmail.com¹

Letícia Helena Guimarães Alvarinho, alvarinho.leticia@gmail.com¹

Daniel Iwao Suyama, daniel.suyama@fca.unicamp.br¹

Aristides Magri, arimagri@fem.unicamp.br²

¹Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Ciências Aplicadas (FCA), R. Pedro Zaccaria, 1300, Jardim Santa Luiza, CEP 13484-350, Limeira – SP.

²Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM), R. Mendeleyev, 200, CEP 13083-860, Campinas – SP.

Resumo: As superligas são amplamente utilizadas na indústria aeroespacial e de óleo a gás devido às suas excelentes propriedades em altas temperaturas como a sua resistência à corrosão, resistência ao desgaste, baixa condutividade térmica. São consideradas ligas de baixa usinabilidade por apresentarem alta taxa de encruamento, boa ductilidade, elevada resistência mecânica em altas temperaturas e baixa estabilidade química com a maioria dos materiais de ferramentas. Deste modo, o objetivo deste trabalho é avaliar o desgaste de ferramentas durante o torneamento da liga 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 aplicadas em uma matriz fatorial completa. Os critérios de fim de vida da ferramenta foram 15 minutos de corte ou até que o desgaste de flanco atingisse $V_B = 0,3$ mm. A ferramenta utilizada neste trabalho foi o inserto CNMG 12 04 04, classe GC1115 da Sandvik com cobertura PVD de TiAlN. Os resultados obtidos indicam que os desgastes de flanco e de entalhe ocorrem em todas as condições e o lascamento da aresta é um tipo de avaria presente em algumas das condições. Velocidades de corte baixas tendem a gerar aderência de material levando a formação de aresta postiça e comprometendo o acabamento da peça. O corte cônico contribuiu para o aumento da vida da ferramenta.

Palavras-chave: Superliga. Torneamento Cônico. Planejamento de Experimentos. Desgaste de ferramenta. Usinabilidade.

1. INTRODUÇÃO

As superligas de níquel são amplamente utilizadas em componentes de alto desempenho que exigem excelentes propriedades como, por exemplo: alto ponto de fusão, baixa condutividade térmica, resistência à corrosão, resistência ao desgaste, manter as propriedades químicas e mecânicas em elevadas temperaturas. Estas propriedades fazem com que as superligas sejam utilizadas na indústria aeroespacial (motores de foguete), química, petroquímica, usinas nucleares (reatores), usinas de energia a vapor (Thelaputta *et al.*, 2017).

As superligas são conhecidas como ligas difíceis de serem usinadas ou ligas que possuem baixa usinabilidade, pois 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. São desenvolvidas elevadas forças de corte e temperaturas em torno da aresta de corte, causando deformação plástica, desgaste acelerado da ferramenta, extrema propensão para soldar o cavaco na ferramenta criando a aresta postiça de corte (Mall, Kumar e Singh, 2014; Ramanujam *et al.*, 2014; Machado *et al.*, 2011).

Durante a usinagem das superligas, ocorre uma intensa geração de calor na interface ferramenta-peça, provocada pela baixa condutividade térmica do material, resultando em uma deformação plástica da ferramenta. Esta deformação aliada a outros fatores como, por exemplo, o encruamento faz com que o substrato da ferramenta seja removido, causando um severo desgaste, o acabamento superficial fique comprometido, e tenha baixa produtividade (Kosaraju *et al.*, 2018).

As ligas à base de níquel por possuírem uma matriz cúbica de face centrada apresentam alta ductilidade, formam cavacos longos durante a usinagem e em baixas velocidades pode ocorrer a formação de aresta postiça de corte e desgaste por aderência (*attrition*). Sua alta taxa de encruamento favorece a formação de uma rebarba na profundidade de corte que contribui para a formação do desgaste de entalhe além de remover a cobertura da ferramenta nesta região. O desgaste abrasivo também ocorre na usinagem destas ligas devido à presença de elementos formadores de carbonetos

e sua baixa estabilidade química com a maioria dos materiais de ferramentas contribui para o desgaste difusivo (Antoniali *et al.*, 2016).

Dentre os tipos de desgaste, o desgaste de flanco, provocado principalmente pela velocidade de corte, e o desgaste de entalhe, causado pela alta temperatura, são observados durante a usinagem de ligas de níquel e estudos são necessários para reduzi-los e aumentar a vida das ferramentas.

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. Sua composição e propriedades mecânicas são apresentadas nas Tab. 1 e Tab. 2.

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

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

Tabela 2. Propriedades mecânicas da liga Inconel 625 (Villares Metals).

Dureza	238 HV
Limite de resistência	730 MPa
Módulo de Young	205 GPa

Os corpos de prova utilizados nos ensaios possuíam formato cilíndrico e dimensões em milímetros 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.

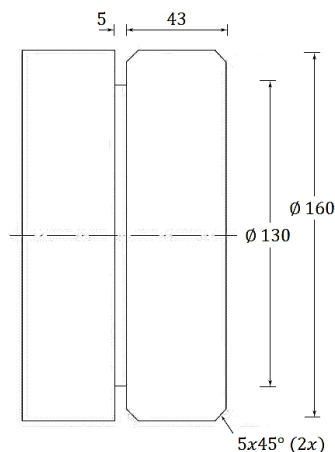


Figura 1. Esquema do corpo de prova em Inconel 625.

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 TiAlN. Foi utilizado um fluido de corte aquoso com óleo miscível de base vegetal com nome comercial B-Cool 655 fornecido pela Blaser Swissslube, com concentração de 10% brix verificada através de refratômetro manual e aplicado a ferramenta com vazão de 4 l/min.

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 (*taper turning* - 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.

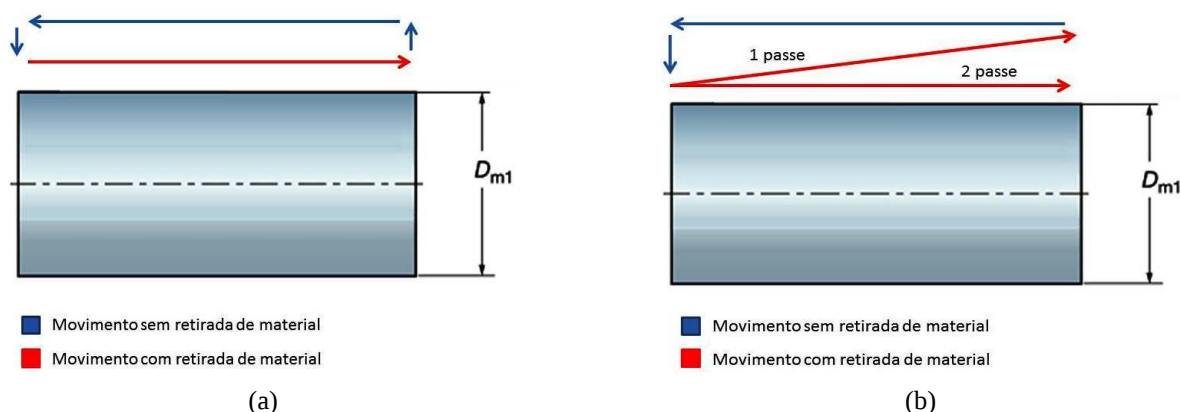


Figura 2. Estratégias de usinagem. (a) Corte longitudinal. (b) Corte cônico ou em rampa.

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 $V_B = 0,3$ 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. A superfície de folga dos insertos era fotografada utilizando-se um microscópio Quimis (com câmera acoplada) e o desgaste foi medido com o auxílio do software Motic Images Plus. Cada uma das condições da Tab. 2 foi reproduzida ao menos 1 vez.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. 3 apresenta os resultados obtidos para a vida da ferramenta em termos de tempo (minutos).

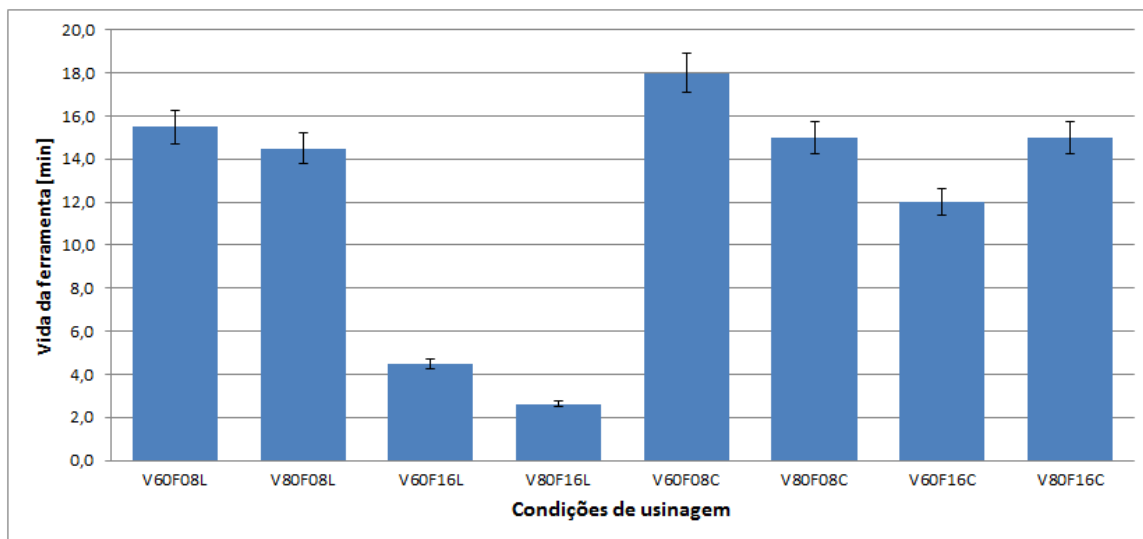


Figura 3. Vida da ferramenta em tempo médio obtido no torneamento da liga Inconel 625.

Nota-se que a utilização do corte cônico provoca um aumento na vida útil das ferramentas (em média). O mesmo ocorre na utilização de velocidades de corte mais baixas ($v_c = 60$ m/min) e avanços mais baixos ($f = 0,08$ mm/rev). Este comportamento está de acordo com a literatura que aponta que condições mais brandas de usinagem promovem vidas de ferramentas mais altas. A Fig. 4 apresenta as imagens dos desgastes observados nas ferramentas em final de vida.

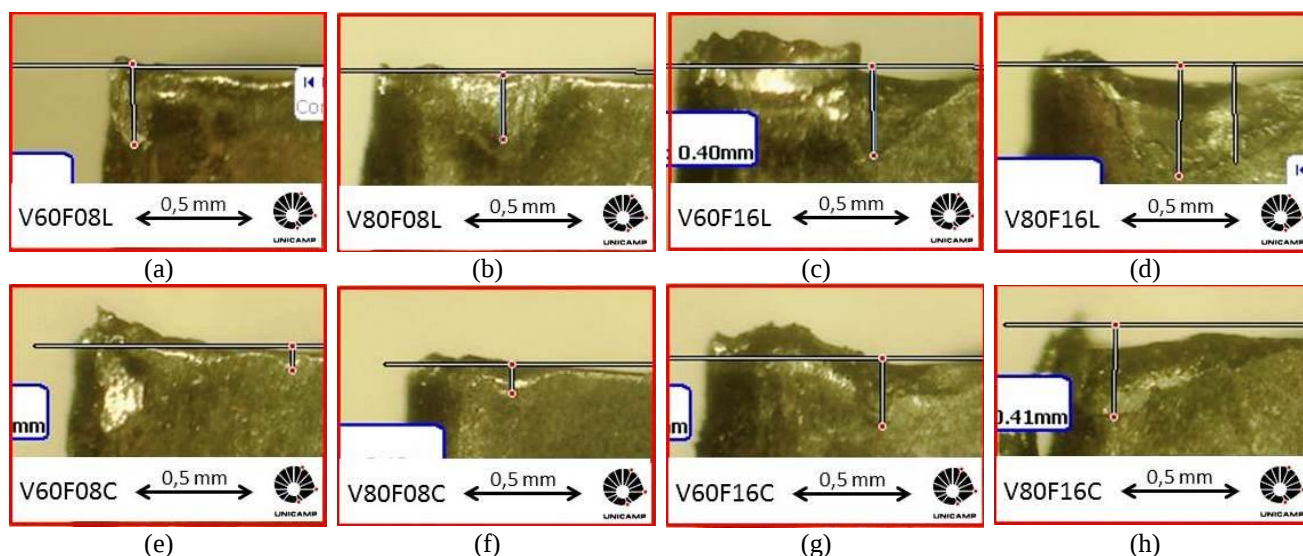


Figura 4. Desgastes na superfície de folga dos inserts, nas condições de corte apresentadas na Tab. 2.

As linhas horizontais em cada uma das imagens da Fig. 4 são as referências utilizadas para medição de desgastes na superfície de folga. De modo geral, as imagens apontam que os desgastes de flanco e de entalhe estão presentes. A utilização da estratégia de corte cônico minimiza este último, mas não impede que ele ocorra (Fig. 4e e Fig. 4g).

As superligas de níquel tendem a sofrer encruamento superficial e, com a utilização de profundidade de usinagem (a_p) constante, esta camada de maior dureza e resistência mecânica entra em contato sempre com a mesma região da aresta da ferramenta. Este contato abrasivo localizado é um dos mecanismos que levam ao desgaste de entalhe e deveria ser evitado com a utilização do corte cônico.

Além dos desgastes, nota-se que diversas arestas sofreram lascamentos. Este tipo de avaria é comum em situações nas quais a classe da ferramenta é muito frágil ou quando a microgeometria da aresta possui uma preparação não suficientemente robusta para a usinagem. Uma vez que a classe da ferramenta é intermediária e a peça foi chanfrada na entrada e na saída do corte para suavizar o contato nestas regiões e evitar este tipo de avaria, possivelmente a microgeometria da aresta ainda não é suficientemente robusta. Além disso, o raio de ponta de 0,4 mm pode ter tido influência na ocorrência desta avaria.

Nas imagens ainda é possível observar a ocorrência de material aderido à ferramenta (Fig. 4c, 4e e 4g). A aderência ocorre devido à ductilidade do material usinado e às condições de corte utilizadas e sua presença pode ser um indicativo da ocorrência de aresta postiça de corte (APC).

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no torneamento externo da liga de níquel 625 (nas condições analisadas) é possível concluir que:

- A usinagem de ligas de níquel tem como grande destaque a ocorrência de desgaste do tipo entalhe;
- O corte cônico contribuiu para a redução do desgaste do tipo entalhe;
- Apesar de recomendadas, as ferramentas com microgeometria positivas e raios de aresta pequenos devem ser utilizados com cuidado, pois tornam as ferramentas sensíveis ao lascamento;
- Devido à ductilidade desta liga de níquel (nas condições utilizadas neste trabalho), velocidades de corte baixas tendem a gerar aderência de material e podem levar à aresta postiça de corte.

Com base nos resultados, a recomendação geral é a utilização de parâmetros e estratégias de corte que evitem o lascamento precoce da ferramenta e a ocorrência acelerada do desgaste de entalhe. Análises futuras, utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV), com espectroscopia de dispersão em energia (EDS), fornecerão respostas mais detalhadas dos mecanismos de desgaste.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Usinagem dos Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP (FEM/UNICAMP) e a Fundação Hermíno Ometto (UNIARARAS).

6. REFERÊNCIAS

- Antoniali, A.; Magri, A.; Diniz, A., 2016, “Tool life and tool wear in taper turning of a nickel-based superalloy”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 87, n. 5-8, p. 2023-2032.
- Kosaraju, S.; Vijay Kumar, M.; Sateesh, N., 2018, “Optimization of machining parameter in turning Inconel 625”, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, n. 2, p. 5343-5348.
- 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.
- Mall, V.K., Kumar, P., Singh, B., 2014, “A review of optimization of surface roughness of Inconel 718 in end milling using Taguchi Method”, *International Journal of Engineering Research Applications*, Vol. 4, n. 12, p.103-109.
- 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, p. 668-676.
- Thellaputta, G., Chandra, P., Rao, C., 2017, “Machinability of nickel-based superalloys: a review”, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, n. 2, p. 3712-3721.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

TOOL WEAR ANALYSIS IN THE TURNING OF INCONEL 625 ALLOY

Diego de Medeiros Barbosa, diegombarbosa@gmail.com¹

Letícia Helena Guimarães Alvarinho, alvarinho.leticia@gmail.com¹

Daniel Iwao Suyama, daniel.suyama@fca.unicamp.br¹

Aristides Magri, arimagri@fem.unicamp.br²

¹State University of Campinas (UNICAMP), School of Applied Sciences (FCA), Pedro Zaccaria St, 1300, Jardim Santa Luiza, CEP 13484-350, Limeira – SP.

²State University of Campinas (UNICAMP), School of Mechanical Engineering (FEM), Mendeleyev St, 200, CEP 13083-860, Campinas – SP.

Abstract: Superalloys are widely used in the aerospace and gas oil industry due to their excellent properties at high temperatures such as their corrosion resistance, wear resistance, and low thermal conductivity. They are considered low machinability alloys because they have high work hardening rate, good ductility, high mechanical resistance at high temperatures and high chemical affinity with most tool materials. Thus, the objective of this work is to evaluate tool wear during turning of the Inconel 625 alloy by means of experimental planning. Cutting speed (60 and 80 m/min), feed (0.08 and 0.16 mm/rev) and machining strategy (longitudinal cut and taper turning) were applied in a full factorial matrix. The end-of-life criteria of the tool were 15 minutes of cutting or until the edge flank wear reached $VB = 0.3$ mm. The tool used in this work was a CNMG 12 04 04 insert, class ISO S15 from Sandvik Coromant with PVD TiAlN coating. The results indicate that flank and notch wear occur under all conditions and edge chipping is a type of failure present in some of the conditions. Low cutting speeds tend to generate material adhesion leading to the formation of a sharp edge and compromising the workpiece finish. The taper turning contributed to the increase of tool life.

Keywords: Superalloys. Taper Turning. Design of Experiments. Tool Wear. Machinability.