

AVALIAÇÃO DO DIRECIONAMENTO DO FLUIDO DE CORTE NO TORNEAMENTO DE INCONEL 625

Aristides Magri, arimagri@fem.unicamp.br¹

Daniel Iwao Suyama, disuyama@yahoo.com.br²

Anselmo Eduardo Diniz, anselmo@fem.unicamp.br¹

Amauri Hassui, ahassui@fem.unicamp.br¹

¹Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Mecânica, Rua Mendeleev, 200, Cidade Universitária “Zeferino Vaz”, CEP 13083-860, Campinas – SP.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Campus de Itaquaquecetuba, Rua Primeiro de Maio, SN, Estação, CEP 08571-050, Itaquaquecetuba - SP

Resumo: As ligas à base de níquel são amplamente utilizadas no segmento de óleo e gás e aeroespacial. Propriedades destas ligas como alta dureza e resistência mecânica a quente, alta taxa de encruamento e ductilidade, presença de carbonetos abrasivos na matriz, baixa condutividade térmica fazem com que ela seja muito difícil de ser usinada. As altas temperaturas desenvolvidas na usinagem fazem com que a vida da ferramenta seja muito baixa em relação àquelas utilizadas na usinagem de aços, por exemplo. Devido à estas dificuldades e à carência de informações a respeito do corte das ligas de níquel, o objetivo deste trabalho é buscar uma combinação de estratégias de utilização de fluido de corte que proporcionem um aumento da vida da ferramenta. Para isso foram testadas 4 estratégias de refrigeração no torneamento do Inconel 625: refrigeração comum em baixa pressão (padrão da própria máquina), refrigeração em baixa pressão, porém com direcionamento para a superfície de folga da ferramenta e refrigeração em alta pressão (70 bars) com fluxo de fluido direcionado à superfície de folga da ferramenta. Foram avaliados o acabamento da peça usinada e a vida da ferramenta até que o desgaste de flanco atingisse 0,2 mm. Independentemente da estratégia de refrigeração, os acabamentos das superfícies usinadas não apresentaram grandes variações. Já a vida da ferramenta foi fortemente influenciada pelo modo como o fluido foi direcionado em relação à região de corte: a refrigeração em alta pressão demonstrou o melhor desempenho entre as quatro condições, a refrigeração em baixa pressão, porém direcionada, apresentou desempenho intermediário, mostrando-se como uma alternativa mais barata e com menor consumo de energia que a refrigeração em alta pressão.

Palavras-chave: Ligas de níquel, Inconel, Refrigeração em alta pressão, Estratégia de refrigeração.

1. INTRODUÇÃO

As indústrias automotiva, aeroespacial e de energia vêm testemunhando uma maior procura por materiais para fabricação de componentes críticos, tais como ligas à base de titânio e à base de níquel, principalmente devido à alta relação resistência mecânica/peso e à capacidade de manter propriedades mecânicas em temperaturas elevadas e em ambientes corrosivos. Isto gerou a necessidade de se criarem modos economicamente viáveis para fabricar componentes que tem estas ligas por base.

Ligas à base de níquel são consideradas muito difíceis de usar quando comparadas ao aço com as mesmas propriedades em temperatura ambiente, pois elas, dentre outras propriedades, mantêm a resistência mecânica em elevadas temperaturas (Ezugwu *et al.*, 2004).

Uma das maneiras de se minimizar os efeitos dos tempos improdutivos causados pelos desgastes das ferramentas é a introdução, no processo, de sistemas de lubrificação e refrigeração eficientes. Porém, na última década as pesquisas tiveram como meta restringir ao máximo o uso de fluidos refrigerantes e/ou lubrificantes na produção metal mecânica. Os fatores importantes que justificam esses procedimentos incluem os custos operacionais da produção, questões, ecológicas, as exigências legais de conservação do meio ambiente e a preservação da saúde do ser humano (Machado e Diniz, 2000).

No trabalho com materiais de difícil usinagem e com refrigeração convencional, o efeito refrigerante dos fluidos de corte é responsável pela retirada de calor da região do corte, porém sua ação pode ser prejudicada uma vez que as altas temperaturas geradas e a consequente evaporação do fluido de corte dificultam a aproximação do fluido das interfaces cavaco-ferramenta e/ou ferramenta-peça. Por outro lado, o efeito lubrificante vai ocorrer se for possível a formação de um filme de óleo que reduza significativamente o atrito, reduzindo a geração de calor e, consequentemente, diminuindo a temperatura da região do corte (Ezugwu e Bonney, 2004).

Na evolução da utilização do fluido de usinagem, na qual o fluido assume um papel maior do que a simples redução da temperatura, surgem conceitos como a “Mínima Quantidade de Fluido” (MQF) e a “Refrigeração em Alta Pressão” (HPC - do inglês *High Pressure Coolant*). A HPC é mais do que simplesmente elevar a pressão da bomba injetora de

fluido de corte (que deve ser no mínimo 70 bars). O princípio por trás da aplicação da refrigeração em alta pressão é a redução na área de saída do fluido (olhal no porta-ferramenta) que produz um aumento na velocidade do fluido que vem do olhal (Sandvik, 2010).

Quanto maior o olhal, maior a vazão que o fluido tem que ter no tubo para que se consiga alta pressão e vice-versa. Além disso, o número de olhais (área de saída acumulada) afetará o resultado da pressão na saída do fluido (a eficiência do olhal e a densidade do fluido também são outros fatores a se considerar). A teoria de Bernoulli expressa a relação entre pressão, velocidade e taxa do fluxo de um fluido, tal como o refrigerante. Como o fluido passa de um tubo de diâmetro maior para um tubo de diâmetro menor (Fig. (1)), as exigências de vazão são menores para obter um jato de alta velocidade (Sandvik, 2010).

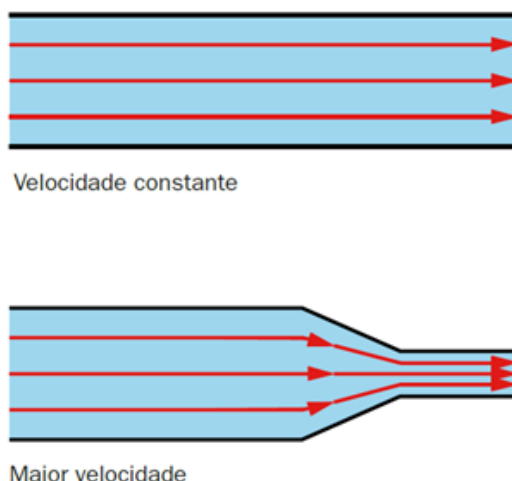


Figura 1. Esquema de escoamento com aumento de velocidade do fluido.
Fonte: Modificado de Sandvik, 2010.

Estudos recentes em que a técnica de aplicação de fluido de corte em alta pressão foi aplicada reportou-se um significativo aumento da produtividade quando comparado ao método convencional de aplicação de fluido de corte. Com isto, maiores velocidades de corte podem ser empregadas durante o processo de usinagem e um surgimento tardio de desgaste poderá ocorrer, melhorando significativamente a eficiência na fabricação das peças produzidas (Tüchumantel, 2010; Kamruzzaman e Dhar, 2008; Diniz e Micaroni, 2007; Crafoord *et al.*, 1999).

Os sistemas que permitem a injeção do fluido de corte em altas pressões não acompanham a configuração padrão das máquinas-ferramenta e são considerados acessórios que devem ser adquiridos à parte. O custo final da aquisição é relativamente elevado, pois demanda além da bomba, filtros para partículas finas e preparação da máquina que irá receber este sistema. Mesmo que os ganhos com vida de ferramenta e produtividade sejam comprovados, os custos com a implantação e o consumo de energia deste acessório adicional devem ser levados em conta.

Além da variação de velocidades de escoamento do fluido (alta ou baixa pressão), o feixe de escoamento também pode ser direcionado de formas diferentes. A Fig. (2) mostra um esquema com os direcionamentos mais comuns.

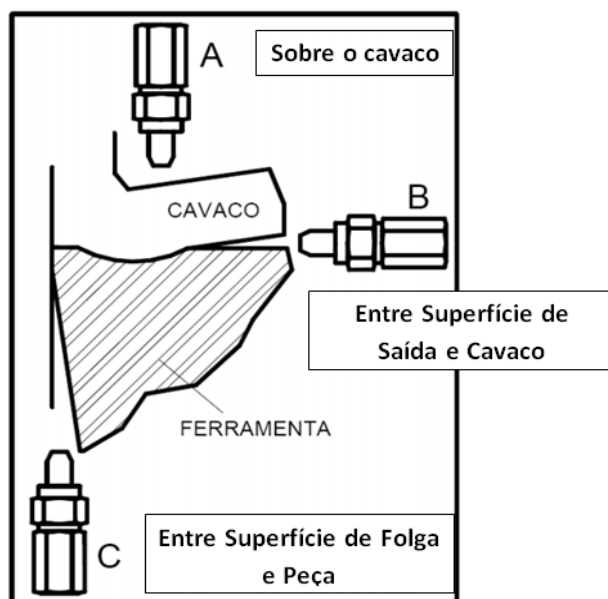


Figura 2. Esquema com direcionamentos do feixe de fluido de corte.
Fonte: Modificado de Shaw, 1984.

Em máquinas-ferramenta, o tipo de refrigeração mais comum é aquele realizado em baixas pressões e sobre o cavaco. Dependendo das características da usinagem (material a ser usinado, operação de usinagem, parâmetros de usinagem, etc.) este tipo de refrigeração não cumpre com a tarefa de refrigerar/lubrificar a região de corte uma vez que não atinge a região de interesse.

Sabendo-se das características da usinagem das ligas à base de níquel, este trabalho tem por objetivo avaliar diferentes estratégias de refrigeração (em baixa e alta pressão) e direcionamento do fluido de corte.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de torneamento da superliga à base de níquel Inconel 625C, foram realizados em um torno CNC da marca Romi, modelo Galaxy 20, com comando numérico GE-Fanuc, potência do motor principal de 15 kW e rotação máxima do eixo árvore de 4500 RPM (variação contínua da rotação).

Para acompanhamento do desgaste das ferramentas, ao longo dos ensaios, foi utilizado um microscópio estereoscópico Quimis (ampliação máxima de 40x) e uma câmera digital Motic conectada a um computador contendo os programas Motim Images Plus, responsável pela aquisição das imagens e pela medição do desgaste.

Para aferir e medir a rugosidade das superfícies usinadas durante os ensaios foi utilizado um rugosímetro portátil Mitutoyo SJ e uma base magnética como suporte do apalpador. As medidas foram feitas no corpo de prova sem a retirada da peça da máquina, assim garantindo a estabilidade da peça e dos resultados (Fig. (3)).

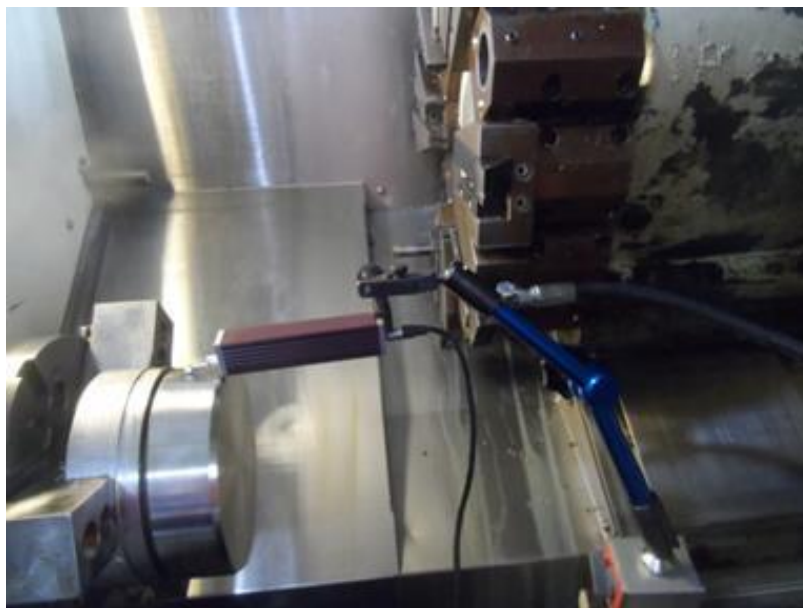
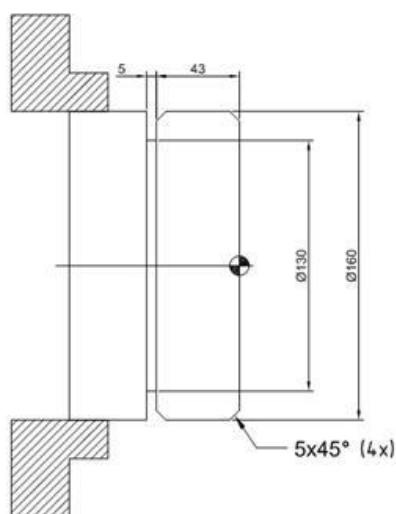
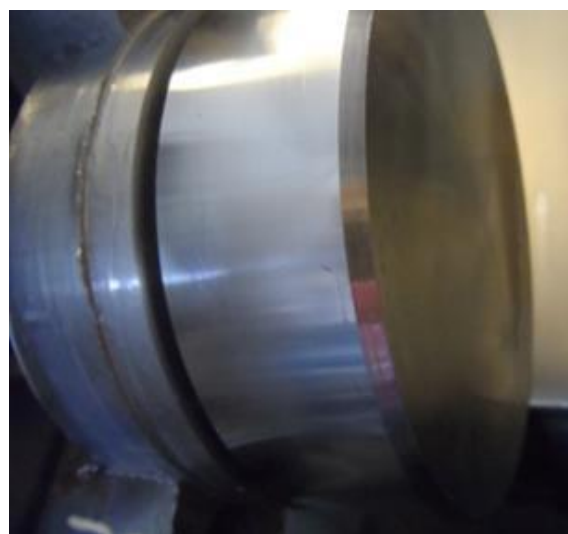


Figura 3. Montagem para medição de rugosidade.

Os corpos de prova utilizados nos testes eram feitos de Liga Inconel 625 e possuíam 152 mm de diâmetro e comprimento de corte de 40 mm - Fig. (4). Os cortes eram realizados em passadas longitudinais (sentido de avanço na direção axial da peça), de tal maneira que o diâmetro do corpo de prova diminuía à medida que o ensaio ocorria.



(a)



(b)

Figura 4. Corpos de prova utilizados: (a) esquema com dimensões e (b) corpo de prova preso à placa com castanhas.

No corpo de prova foram feitos chanfros no início da peça para evitar um abrupto crescimento da carga sobre a ferramenta em sua entrada na peça. Ao fim do comprimento de corte da peça foi feito um sulco, para que não houvesse atrito excessivo da ferramenta contra a peça no momento de sua saída do corte.

A composição química fornecida pelo fabricante é apresentada na Tab. (1).

Tabela 1. Composição química da Liga 625 fornecida pelo fabricante (%) - valores fornecidos pelo fabricante.

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

Além disso, foram realizadas medições de dureza nos corpos de prova que resultaram em dureza de 228 HV (Dureza Vickers).

Foram utilizados insertos de metal duro com geometria e classe CNMG 12 04 04 GC 1115 (equivalente à ISO S20, com cobertura PVD à base de óxido TiAlN/AlCrO) e suporte PCLNR 2525 M12, ambos da Sandvik Coromant (Fig. (5)).

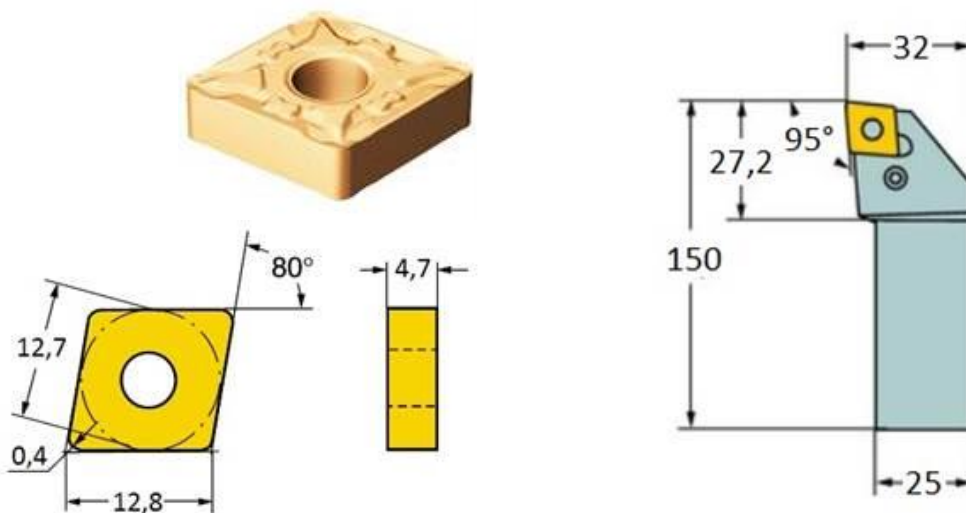


Figura 5. Dimensões do suporte e das ferramentas utilizadas nos testes de torneamento.

Os parâmetros de usinagem utilizados foram obtidos através de pré-testes e são os apresentados na Tab. (2).

Tabela 2. Parâmetros de usinagem utilizados.

Velocidade de corte (v_c)	65 m/min
Avanço (f)	0,08 mm/volta
Profundidade de usinagem (a_p)	0,5 mm

As condições de refrigeração utilizadas foram: a convencional (fluido abundante em baixa pressão - característico da máquina) e em alta pressão (com sistema auxiliar em 70 bar). Em refrigeração convencional o fluido foi aplicado de forma abundante, sobre o cavaco, utilizando-se os olhais presentes da torre da máquina (Fig. (2A)) e também direcionado à interface entre a superfície de folga e a peça (Fig. (2C)) por meio de um bico modificado (Fig. (6a)). Em alta pressão, foram utilizados a o direcionamento na superfície de saída da ferramenta (interface cavaco-ferramenta) (Fig. (2B)) por meio de olhais presentes no suporte da ferramenta (específico para altas pressões) e por meio de um bico com diversos olhais direcionados à superfície de folga da ferramenta (interface peça-ferramenta), a ser chamado deste ponto em diante por “chuveiro” (Fig. (6b)).



Figura 6. Bicos para direcionamento de fluido de corte: (a) para refrigeração convencional modificada e (b) para alta pressão “chuveiro”.

A Fig. (7) mostra uma das montagens experimentais utilizadas: refrigeração convencional com bico modificado.



Figura 7. Montagem para refrigeração convencional modificada.

2.1. Planejamento Experimental

Foram realizados passes longitudinais e, a cada três passadas (aproximadamente 3 minutos de corte), a ferramenta era retirada e submetida à análise no microscópio ótico. Sua superfície de folga era fotografada e, depois de realizada a calibração da imagem por meio de uma escala, o desgaste de flanco era medido e também eram realizadas as medidas de rugosidade média (R_a) e máxima (R_z), da superfície da peça usinada. Um ensaio terminava quando o desgaste de flanco da ferramenta atingia $V_B = 0,2$ mm (ferramenta era considerada em fim de vida). Cada ensaio foi realizado duas vezes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizados testes de torneamento e os resultados sobre vida de ferramenta e rugosidade superficial são apresentados a seguir.

A Fig. (8) mostra os resultados sobre vida de ferramenta considerando o volume de material removido apresentado para cada condição de direcionamento de fluido de refrigeração.

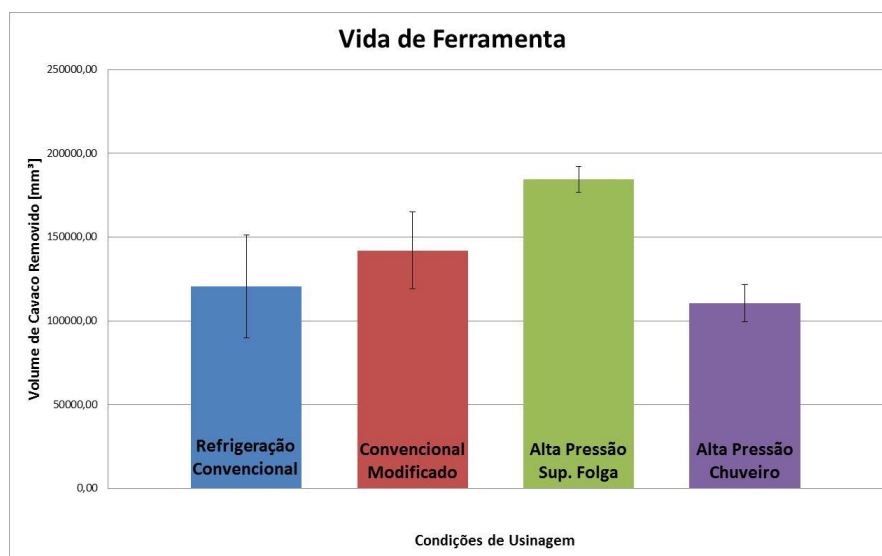


Figura 8. Vida de ferramenta em termos de volume de material removido.

A partir da Fig. (8), é possível observar que a condição que permitiu a maior remoção de material foi a refrigeração em alta pressão e esta é então recomendada quando se deseja usinar ligas à base de níquel.

Uma alternativa ainda usando alta pressão do fluido foi a utilização do direcionamento do fluido contra a superfície de folga com o bico chamado “chuveiro”. Nela, o fluido de corte em alta pressão era dividido em cerca de 20 olhais com diâmetros de 1,5 mm e esperava-se que o espalhamento do fluido promovesse uma refrigeração mais eficiente. No entanto, os resultados mostraram que este tipo de direcionamento promoveu redução na vida da ferramenta, possivelmente por causar dispersão excessiva do jato de fluido de corte, não atingir as regiões próximas do corte e não extrair de forma eficiente o calor. O direcionamento do fluido na interface entre a superfície de folga e a peça não altera a área da ferramenta que está em contato com o cavaco (na chamada zona primária de cisalhamento) assim, não altera a geração de calor nesta região e permite que uma parcela maior de calor seja conduzida para a ferramenta.

Na maioria do parque fabril brasileiro, as máquinas-ferramenta não dispõem de bombas de alta pressão (acessório de custo relativamente elevado). Assim, foram testadas outras duas hipóteses: a refrigeração convencional em baixa pressão (que é o sistema usualmente utilizado nas máquinas) e uma refrigeração convencional em baixa pressão, porém com um bico direcionador adaptado.

Com base na Fig. (8), devido à grande sobreposição dos desvios, não permite afirmar que o bico direcionado modificado teve um melhor desempenho que a refrigeração convencional ou a refrigeração em alta pressão com bico “chuveiro”. Porém, se for levado em consideração os valores das médias, a refrigeração convencional com bico modificado apresentou resultados melhores que as supracitadas. Apesar do direcionamento do fluido nesta condição também ser na interface superfície de folga e peça, a baixa pressão faz com que o fluido tenha tempo de envolver a região de corte e promover uma extração de calor mais eficiente que a alta pressão com bico “chuveiro”.

Os resultados indicam que, em média, a utilização de refrigeração convencional com bico modificado pode ser uma alternativa caso a refrigeração em alta pressão não esteja presente. Esta é uma alternativa de baixo custo, fácil de ser construída em qualquer meio industrial e que não causa aumento do consumo de energia elétrica, como é o caso da refrigeração em alta pressão.

A Fig. (9) mostra os resultados de acabamento superficial obtidos nos ensaios. São apresentados os valores de rugosidade máxima em início e fim de vida da ferramenta.

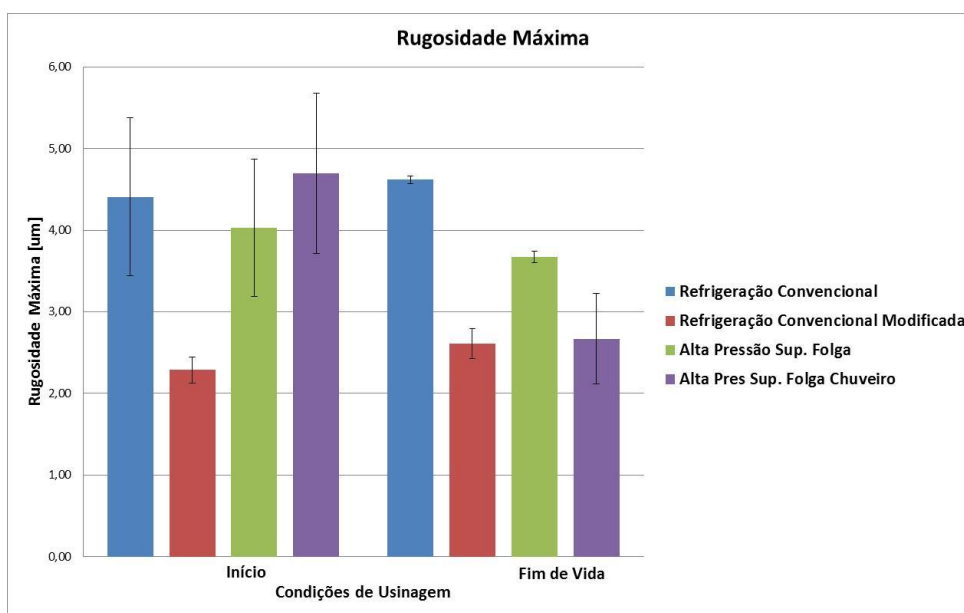


Figura 9. Rugosidade máxima da superfície usinada.

Com base na Fig. (9) é possível observar que a refrigeração convencional com bico modificado apresentou as melhores superfícies acabadas. As demais condições geraram valores de rugosidade mais elevados e em mesma faixa de valores.

A rugosidade superficial de um componente usinado é composto basicamente por 3 fatores de influência: geometria da ferramenta (e sua relação com os parâmetros de usinagem), vibrações inerentes ao processo e características do material que está sendo usinado (materiais de elevada ductilidade geralmente tem acabamento prejudicado pelo amolecimento proporcionado pelo aumento da temperatura). Na prática, o melhor acabamento superficial que se pode obter é aquele que leva em consideração somente o fator geométrico (com ausência de vibrações e influência das propriedades mecânicas da peça), conforme indica a Fig. (10) e a Eq. (1).

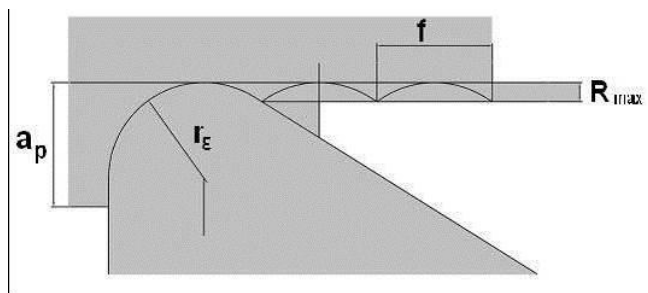


Figura 10. Perfil teórico de rugosidade de uma peça torneada.
Fonte: Modificado de Diniz, Marcondes e Coppini, 2013.

$$R_{\text{máx}} = \frac{f^2}{8r_{\epsilon}} \quad (1)$$

Os valores de rugosidade máxima apresentados pela refrigeração convencional com bico modificado são aqueles que mais se aproximam do valor teórico de 2 µm. Tal fato é um indicativo que, para esta condição, a influência de vibrações e do material usinado é quase nula.

Em fim de vida da ferramenta, os valores obtidos seguem o mesmo padrão que em início de vida. Este comportamento leva à conclusão que o desgaste da ferramenta não modificou a forma da ponta da mesma. Em alguns casos, o desgaste deve ter causado afiação da aresta, o que propiciou a geração de rugosidade menor em fim de vida (como é o caso da refrigeração em alta pressão com bico “chuveiro”).

Portanto, se for levado em conta o acabamento superficial, a escolha da refrigeração convencional com bico modificado é uma das melhores escolhas devido ao melhor custo-benefício e à obtenção dos menores valores de rugosidade.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, é possível concluir para o torneamento da liga Inconel 625 em condições similares à utilizadas neste trabalho, que:

- A refrigeração em alta pressão com fluido de corte direcionado à superfície de saída da ferramenta gerou maior vida de ferramenta dentre todas as condições testadas.
- A dispersão do fluido de corte causada pelo chuveiro reduz a eficiência do sistema de alta pressão e com isso diminui a vida da ferramenta;
- O uso de fluido de corte em baixa pressão direcionado à superfície de folga causou aumento de vida de ferramenta quando comparado com a refrigeração em baixa pressão convencional;
- Na condição em que se direciona o fluido de corte em baixa pressão à superfície de folga foi aquela que gerou menor rugosidade da peça dentre todas as condições de refrigeração testadas;

Baseado nestes resultados, pode-se concluir que a refrigeração em baixa pressão, mas com fluxo de fluido direcionado à superfície de folga, é uma boa opção ao uso de alta pressão, já que é mais barata, fácil de ser construída, com menor consumo de energia elétrica e que gera vida de ferramenta maior que a refrigeração convencional, com rugosidade baixa da peça.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Sandvik Coromant e à Blaser Swissslube pelo auxílio no andamento do trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- CRAFOORD, R., KAMINSKI, J., LAGERBERG, S., LJUNGKRONA, O., WRET LAND, A., 1999, “Chip control in tube turning using a highpressure water jet”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, v. 213, B8, p. 761-767.
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F., COPPINI, N., 2013, “Tecnologia da Usinagem dos Materiais”, Ed. Artliber, São Paulo, Brazil, 270 p.

- DINIZ, A. E., MICARONI, R., 2007, “The influence of the direction and flow rate of the cutting fluid on tool life in turning process of AISI 1045 steel”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. v. 47, n. 2, p. 247-254.
- EZUGWU, E.O., BONNEY, J., 2004, “Effect of high-pressure coolant supply when machining nickelbase, Inconel 718, alloy with coated carbide tools”, *Journal of Materials Processing Technology*, v.153-154, p. 145 – 1050.
- EZUGWU, E.O., BONNEY, J., SILVA, R. B., MACHADO, A. R., 2004, “Evaluation of the performance of different nano-ceramic tool grades when machining nickel-base, inconel 718 alloy”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v.26 n.1.
- KAMRUZZAMAN M., DHAR, N. R., 2008, “Effect of applying high pressure coolant (HPC) jet in machining of 42CrMo4 steel by uncoated carbide inserts”, *Journal of Mechanical Engineering*, v. 39, n. 2, p. 71-77.
- MACHADO, A.R., DINIZ, A.E., 2000, “Vantagens e desvantagens do uso (ou não) de fluidos de corte”, *Máquinas e Metais*. v. 37 (419), p. 134 – 151.
- SANDVIK Coromant, 2010, “Usinagem com refrigeração de alta pressão para melhor produtividade e melhores resultados”. São Paulo: Sandvik.
- SHAW, M.C., 1984, “Metal Cutting Principles”, New York: Oxford University Press, 594p.
- TÜCHUMANTEL, T., 2010, “Reduza o aquecimento nas altas velocidades de corte”, *O Mundo da Usinagem*, v.63, p. 6 - 10.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

EVALUATION OF THE DIRECTION OF THE CUTTING FLUID IN THE TURNING OF INCONEL 625

Aristides Magri, arimagri@fem.unicamp.br¹

Daniel Iwao Suyama, disuyama@yahoo.com.br²

Anselmo Eduardo Diniz, anselmo@fem.unicamp.br¹

Amauri Hassui, ahassui@fem.unicamp.br¹

¹University of Campinas (UNICAMP), College of Mechanical Engineering, Mendeleev St, 200, Cidade Universitária “Zeferino Vaz”, CEP 13083-860, Campinas - SP.

²National Institute of Education, Science, and Technology of São Paulo (IFSP), Campus of Itaquaquecetuba, Primeiro de Maio St, Estação, CEP 08571-050, Itaquaquecetuba - SP

Abstract: Nickel based alloys are widely used in the oil and gas, aerospace, and power segment. Properties of these alloys such as high hardness and mechanical strength at high temperatures, high strain hardening rate and ductility, presence of abrasive carbides in the matrix, and low thermal conductivity make them very difficult to be machined. The high temperatures developed in the machining make the tool life very short when compared to those used in the machining of steels, for example. Due to these difficulties and the lack of information regarding the cutting of nickel alloys, the objective of this work is to evaluate cutting fluid strategies in terms of tool life and workpiece surface roughness. Aiming this goal, 4 cooling strategies were tested in Inconel 625 turning: conventional low pressure refrigeration (own machine standard), low pressure refrigeration, but with flow rate directed towards the tool flank face, high pressure refrigeration (70 bars) towards tool rake face, and high pressure with fluid flow dispersed over the chip. Machined workpiece finish and tool life were evaluated until tool flank wear reached 0.2 mm. Regardless the cooling strategy, the roughness of the machined surfaces did not show great variations between those obtained with fresh and worn conditions. The life of the tool was strongly influenced by the way the fluid was directed at the cutting region: the high pressure refrigeration showed the best performance among the four conditions, the low pressure fluid directed towards flank face presented intermediate performance, showing itself as an alternative to the impossibility of using high pressure.

Palavras-chave: Nickel Alloys, Inconel, High Pressure Coolant, Coolant Strategies.