

SISTEMA DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO SOB ALTA PRESSÃO APLICADO AO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL SUPERMARTENSÍTICO

Deibe valgas dos santos^{1,2}, Alexandre Mendes Abrão², Michele Lisboa Silveira², Augusto Moura Martins²

¹Centro Universitário UMA, Av. Afonso Vaz de Melo, 640, Barreiro, Belo Horizonte, MG.

²Escola de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG.

deibe.santos@prof.una.br^{1,2}, abraão@demec.ufmg.br², michelesilveira1991@gmail.com², augusto.mmartins2@gmail.com²

Resumo. Os fluidos de corte são empregados no processo de usinagem com objetivos de assegurar lubrificação e refrigeração adequadas durante a remoção do material. O sistema de lubri-refrigeração sob alta pressão traz consigo as vantagens adicionais de reduzir a área de contato cavaco-ferramenta e auxiliar na quebra do cavaco durante o corte, principalmente em materiais de difícil usinabilidade ou que produzem cavacos longos, os quais são indesejáveis. O objetivo deste trabalho é a montagem de um sistema de lubri-refrigeração sob alta pressão (utilizando a bomba de uma lavadora de alta pressão) a ser empregado no torneamento do aço inoxidável supermartensítico. Utilizou-se durante os testes comparativos de torneamento - com aplicação de fluido de corte sob baixa e alta pressão - diferentes valores de velocidade de corte (200, 250 e 300 m/min), avanço de 0,1 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,7 mm e inserto de metal duro revestido. O sistema de alta pressão forneceu fluido de corte a uma pressão de 8 MPa, vazão de 5 l/min e velocidade teórica do fluido de 101 m/s. Foi avaliada a rugosidade da superfície torneada e a forma dos cavacos produzidos. Os resultados indicaram que a velocidade de corte e a aplicação do fluido de corte sob baixa ou alta pressão não afetaram significativamente a rugosidade da superfície torneada. Utilizando fluido de corte sob baixa pressão, foram gerados cavacos emaranhados longos, porém, a forma do cavaco modificou-se para arco solto quando utilizou-se fluido de corte sob alta pressão.

Palavras chave: Aço inoxidável supermartensítico, Forma do cavaco. Rugosidade. Lubri-refrigeração sob alta pressão.

1. INTRODUÇÃO

Para o entendimento completo dos fenômenos associados à usinagem dos materiais, tais como acabamento superficial, desgaste da ferramenta, forças de usinagem, etc., é importante um estudo minucioso sobre a formação do cavaco. Em geral, o material da peça é o que mais influencia a forma e o tipo do cavaco. Os parâmetros de corte também podem contribuir para a mudança da forma do cavaco, como exemplo, um aumento da velocidade de corte, uma redução no avanço, tendem a produzir cavacos em fitas ou contínuos (em materiais dúcteis). O avanço é o parâmetro mais influente, seguido da profundidade de corte (Ferraresi, 1970 e Machado *et al.*, 2015).

De uma forma geral, as formas dos cavacos se resumem em fita, espiral, helicoidal, lasca ou pedaço. A norma ISO 3685 (1993) detalha a classificação dos cavacos quanto a sua forma. A forma dos quebra-cavacos modifica a superfície de saída das ferramentas, promovendo uma curvatura mais acentuada nos cavacos e levando-os à quebra por flexão. Um método bastante eficiente na quebra do cavaco é a aplicação da lubri-refrigeração sob alta pressão, neste caso, o jato apresenta uma força suficiente para promover a quebra ou fragmentação do cavaco.

Existem diversos parâmetros que podem influenciar o acabamento da superfície da peça usinada (avanço, velocidade de corte, fluido de corte, rigidez da máquina e etc.). A norma ABNT NBR ISO 4287 (2002) apresenta os parâmetros desvio aritmético médio (Ra) e a altura máxima do perfil (Rz) dentre os principais parâmetros de rugosidade, sendo que o Ra é amplamente empregado como parâmetro de controle de processo. Em casos onde se deseja especificar a rugosidade máxima, Rz deve ser empregado, pois é diretamente influenciado por qualquer defeito ou irregularidade na superfície (Diniz *et al.*, 2013 e Machado *et al.*, 2015).

Neste contexto, a utilização de fluido do corte sob alta pressão é capaz de promover alteração na forma do cavaco, propiciando sua fratura periódica.

Segundo Santos e Sales (2007), um dos objetivos da lubri-refrigeração sob alta pressão é melhorar a quebra do cavaco, minimizando os transtornos que os cavacos longos podem causar (podem emaranhar na peça, alto volume que ocupam, aumentam forças de usinagem e temperatura e podem prejudicar o acabamento superficial ao aderir a peça).

O princípio da dinâmica dos fluidos apresentado por Bernoulli descreve o comportamento do fluido ao se mover em um tubo. O princípio Bernoulli relata que um aumento da velocidade do fluido ao longo do tubo é acompanhada da diminuição da pressão para um fluxo sem viscosidade.

As Equações (2.1) e (2.2), propostas por Bernoulli, permitem a determinação teórica, respectivamente, da vazão Q e da velocidade do fluido, onde C_D é a eficiência de escoamento do fluido (adota-se 80% para 0,02-30 MPa e 70% para 30-100 MPa); D é o valor do diâmetro da seção do bico (m); P é a pressão de entrada do fluido (Pa); ρ é a densidade ou

massa específica do fluido (para água e fluidos de corte foi considerada 1000 kg/m^3) e n é o número de bicos injetores do sistema.

$$Q = C_D * n * \frac{\pi * D^2}{4} * \sqrt{\frac{2P}{\rho}} \quad (2.1)$$

$$v = C_D * \sqrt{\frac{2P}{\rho}} \quad (2.2)$$

Este trabalho apresenta a montagem de um sistema de lubri-refrigeração sob alta pressão utilizando a bomba de uma lavadora de alta pressão. Testes de desempenho foram realizados no torneamento do aço inoxidável supermartensítico (classe CA6NM, conforme a norma ASTM A743), utilizando-se velocidades de corte de 200, 250 e 300 m/min, avanço de 0,15 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,7 mm. Foram avaliadas a vazão e pressão alcançadas pelo sistema sob alta pressão, rugosidade (parâmetros Ra e Rz) da superfície torneada e forma do cavaco produzido utilizando lubri-refrigeração sob baixa e alta pressão.

2. MATERIAIS E METODOLOGIA

O material utilizado na confecção dos corpos de prova foi o aço inoxidável supermartensítico (AISM) da classe CA6NM, conforme a norma ASTM A743. Os testes de torneamento foram realizados empregando insertos de metal duro Mitsubishi Carbide MC 7015 da classe ISO GC 2015 (HC)-M15 com revestimento TiCN + Al_2O_3 + TiN, com geometria ISO SNMG 12 04 08 e quebra-cavaco MM, montados em um porta-ferramenta Iscar código PSSNR-JHP 2525 M12. Os testes de torneamento foram realizados em um torno Romi modelo Centur 30S com a utilização do fluido de corte (Petronas MECAFLUID S 3000 - sintético) com concentração mantida em 5%. As medições das rugosidades foram efetuadas com um rugosímetro Surtronic-25. Foram efetuadas três medições equidistantes em aproximadamente 120° . Antes de realizar cada medição, a superfície do corpo de prova foi limpa com papel absorvente para retirada de resíduos. De acordo com as orientações da norma ABNT NBR ISO 4287 (2002), foi utilizado um comprimento de amostragem de 0,8 mm. A Figura 1 ilustra os equipamentos e materiais utilizados nos testes.

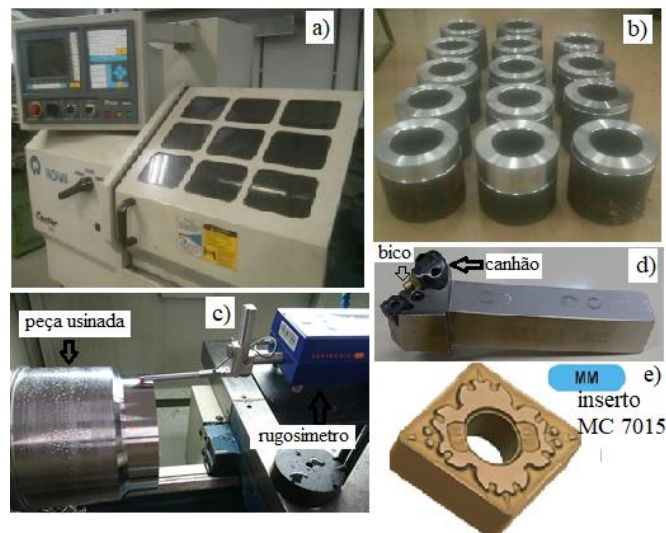


Figura 1. Equipamentos e materiais: (a) torno Centur 30S, (b) corpos de prova, (c) medição da rugosidade, (d) porta-ferramenta e (e) inserto de metal duro MC 7015.

O sistema de lubri-refrigeração sob alta pressão empregou uma bomba centrífuga série CAM-W4C P com potência de 0,245 kW para bombear o fluido de corte do reservatório do torno para uma lavadora a alta pressão TEKNA modelo HLX140VZ (potência de 1,8 kW, vazão de 5,7 litros /min e pressão máxima de 13,5 MPa). Foi utilizado um filtro de bronze tipo Y para reter partículas sólidas do reservatório da máquina. Para o sistema da lubri-refrigeração sob baixa pressão utilizou-se o próprio sistema do torno. A Figura 2 ilustra esquematicamente a montagem do sistema de alta pressão.

A vazão do fluido de corte foi determinada de forma experimental e teórica por meio das Eq. (2.1 e 2.2); foram feitas 10 medições para determinar a vazão de cada sistema de lubri-refrigeração utilizando um recipiente graduado de 10 litros e um cronômetro. Para se obter o valor da pressão da condição sob alta pressão utilizou-se um manômetro na saída da bomba para o porta-ferramenta e para a condição sob baixa pressão utilizou-se um manômetro na saída da bomba da máquina-ferramenta. O diâmetro do orifício de saída do jato de fluido de corte a alta pressão é de 1 mm localizado a aproximadamente 10 mm de distância da ponta da ferramenta. O diâmetro do orifício da mangueira da

refrigeração convencional é 2,7 mm e a distância do bocal até a ponta do inserto sob condição de jorro é de aproximadamente 40 mm.

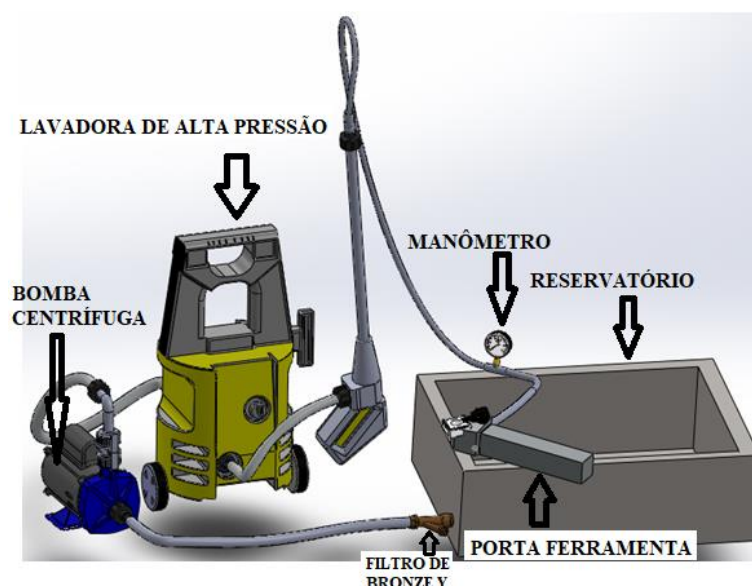


Figura 2. Montagem do sistema de lubri-refrigeração a alta pressão.

A Tabela 1 apresenta as variáveis de entrada (fatores) para os testes, a partir de recomendação do fabricante da ferramenta de corte. Os valores de avanço e profundidade de usinagem foram mantidos constantes em 0,15 mm/rev e 0,7 mm, respectivamente.

Tabela 1. Fatores e níveis empregados nos testes de torneamento.

Fatores	Níveis
Velocidade de corte	200, 250 e 300 (m/min)
Lubri-refrigeração	baixa pressão e alta pressão
Ferramenta	MC 7015 (ISO -HC-M15)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados experimentais de pressão e vazão, juntamente com a velocidade teórica do fluido, para cada condição de lubri-refrigeração (baixa e alta pressão). Observa-se que o sistema da lubri-refrigeração sob alta pressão proporcionou um aumento expressivo da velocidade do fluido de corte, 101 m/s, em comparação com a velocidade do fluido sob baixa pressão, 11,3 m/s. A vazão do fluido sob alta pressão também foi maior, 5 l/min, em relação ao fluido sob baixa pressão, 4,3 l/min. O valor da vazão teórica sob alta pressão ficou em média 24% mais baixa do que a vazão experimental e para o valor da vazão do fluido teórica sob baixa pressão ficou 27,91% menor do que a vazão experimental.

Tabela 2. Pressão, vazão e velocidade do fluido de corte.

Condição	Pressão (MPa)	Vazão experimental (l/min)	Vazão teórica (l/min)	Velocidade teórica do fluido (m/s)
Baixa pressão	0,1	4,3	3,1	11,3
Alta pressão	8,0	5,0	3,8	101

Os Gráficos 1 e 2 apresentam os resultados das rugosidades Ra e Rz. Observou-se que na condição de velocidade de corte de 200 m/min e lubri-refrigeração sob alta pressão apresentou menor valor da rugosidade Ra seguida por 300 e 250 m/min (Gráfico 1). Porém, sob a condição de velocidade de corte de 300 m/min e lubri-refrigeração sob baixa pressão os valores de rugosidade Ra foi menor do que na condição da lubri-refrigeração sob alta pressão. O comportamento da rugosidade Rz foi similar para as velocidades de corte de 200 e 250 m/min. No entanto, para a velocidade de corte de 300 m/min a lubri-refrigeração sob alta pressão apresentou o valor menor da rugosidade Rz (Gráfico 2).

Gráfico 1: Resultado da rugosidade Ra em função da lubri-refrigeração e velocidade de corte.

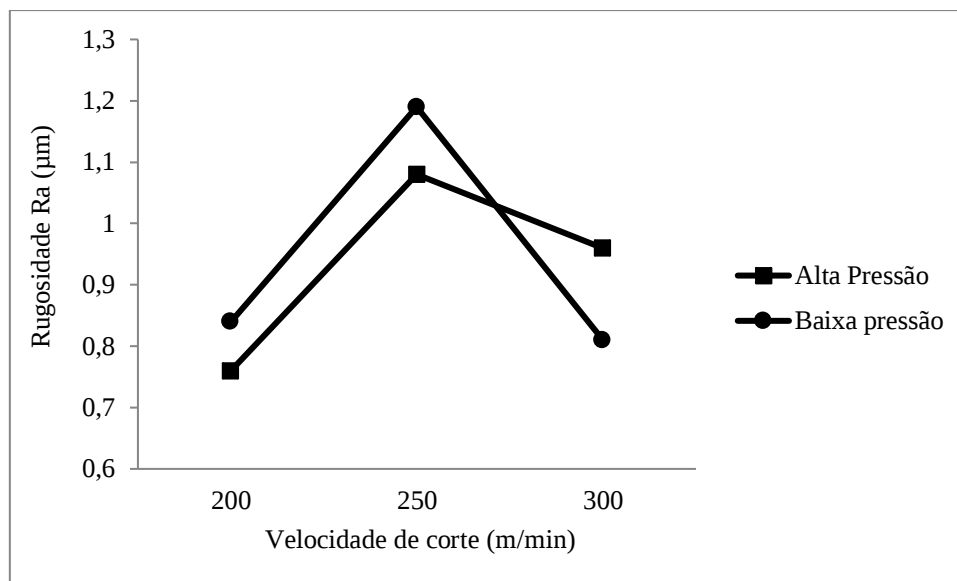
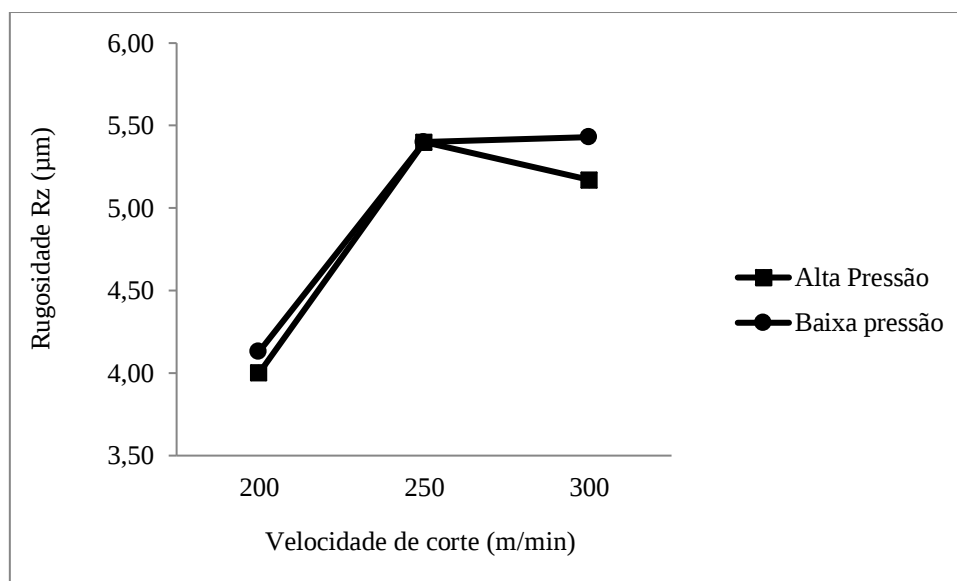


Gráfico 2: Resultado da rugosidade Rz em função da lubri-refrigeração e velocidade de corte.



Segundo a norma ABNT NBR ISO 4287 (2002), os valores recomendados para o comprimento de amostragem e de avaliação estão de acordo com a distância entre os sulcos (avanço de 0,1 a 0,32 mm/rev). Desta forma, o comprimento de amostragem foi de 0,8 mm e o de avaliação de 4 mm. Nesta faixa a rugosidade Ra e Rz esperada foram de 0,1 até 2 μm e 0,5 até 10 μm , respectivamente. A classe da rugosidade tratada refere-se a N7 (aplicável em assentos de rolamentos, cabeça de pistão, faces de união de caixas de engrenagem e etc.) e N6 (aplicável em válvula de esferas, tambor de freios e etc.) sendo que para a classe N7 é realizável em usinagem comum. E para a classe N6 é realizável com cuidados e métodos especiais em operação de torneamento. Notou-se que os testes com velocidade de corte de 200 m/min e lubri-refrigeração sob alta pressão a rugosidade Ra atendeu a classe N6.

As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados da análise de variância para rugosidade Ra e Rz, respectivamente, para um nível de confiança de 95%. Nota-se na tabela 3 que nenhum fator influenciou a rugosidade Ra, porém, na tabela 4 o fator velocidade de corte influenciou na rugosidade Rz e apresentou uma contribuição de 98,12 %. Nota-se no Gráfico 3 que a velocidade de corte de 200 m/min apresentou menores rugosidade Rz.

Tabela 3. Análise de variância para desvio médio aritmético (R_a).

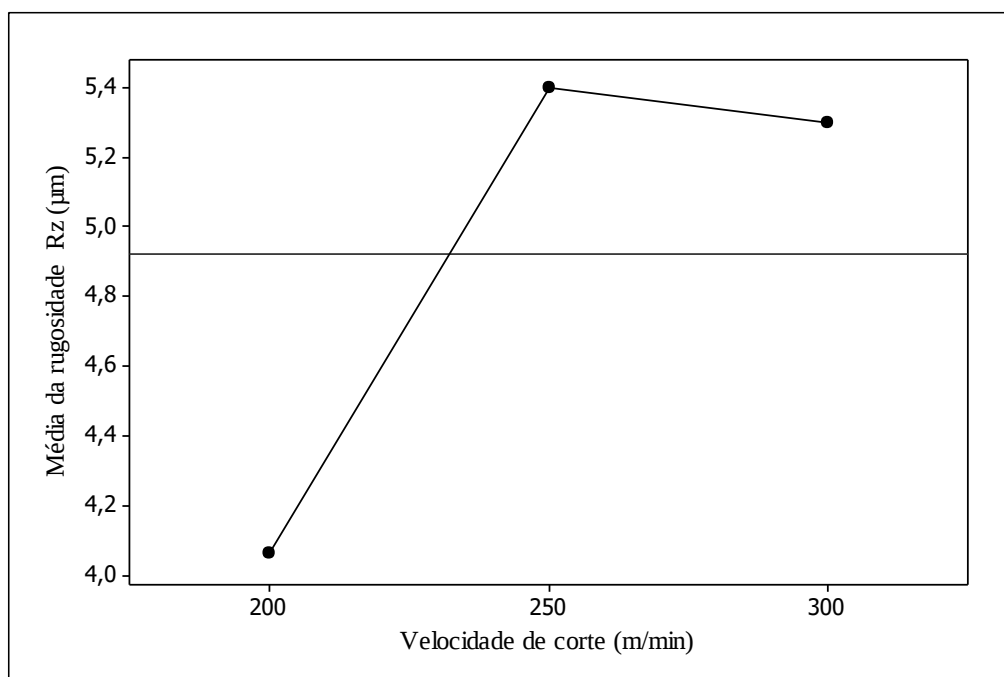
Fonte	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado médio	Valor F	p-valor
Velocidade de corte (v_c)	2	0,12130	0,0606	6,00	0,143
Lubri-refrigeração	1	0,00027	0,00027	0,03	0,886
Erro	2	0,02023	0,02023		
Total	5	0,14180			
R-Sq=85,73 %		R-Sq(adj)= 64,33%			

Tabela 4. Análise de variância para altura máxima do perfil (R_z).

Fonte	Grau de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado médio	Valor F	p-valor
Velocidade de corte (v_c)	2	2,21163	1,10582	130,87	0,008
Lubri-refrigeração	1	0,02535	0,02535	3,00	0,225
Erro	2	0,01690	2,020		
Total	5	2,25388			
R-Sq = 99,25%		R-Sq(adj) = 98,13%			

De uma forma geral, o acabamento superficial melhora com o aumento da velocidade de corte, porém, a melhoria é até uma determinada velocidade sendo que esta velocidade varia bastante em função dos fatores: material da ferramenta, ângulo de saída, fluido de corte e etc. Com o aumento da velocidade de corte a rugosidade oscila devido à vibração do sistema máquina-peça-ferramenta-dispositivo de fixação para cada faixa de velocidade de corte. Portanto, o aumento da velocidade de corte promoveu maiores vibrações no sistema favorecendo à maiores valores de rugosidade R_z .

Gráfico 3: Resultado da influencia da velocidade de corte sobre a rugosidade R_z .



A Figura 3 ilustra as formas dos cavacos gerados nos ensaios com velocidades de corte de 200, 250 e 300 m/min e lubri-refrigeração sob baixa e alta pressão. Nota-se que a forma do cavaco não apresentou diferença em função do aumento da v_c com lubri-refrigeração sob baixa pressão, predominando a forma em fita emaranhada (Figs. 3a, 3b e 3c). Por outro lado, a aplicação de fluido de corte sob alta pressão alterou a forma do cavaco: quando utilizou-se a velocidade de corte de 200 m/min, a forma do cavaco foi em arco solto (Fig. 3.3d). Já para $v_c = 250$ m/min e $v_c = 300$ m/min (Figs. 3 e 3f, respectivamente) a forma do cavaco foi semelhante, porém, em arco conectado). O jato sob alta pressão direcionado entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta promoveu a formação de uma cunha hidráulica, o que propiciou sua fratura periódica (Naves *et al.*, 2013).

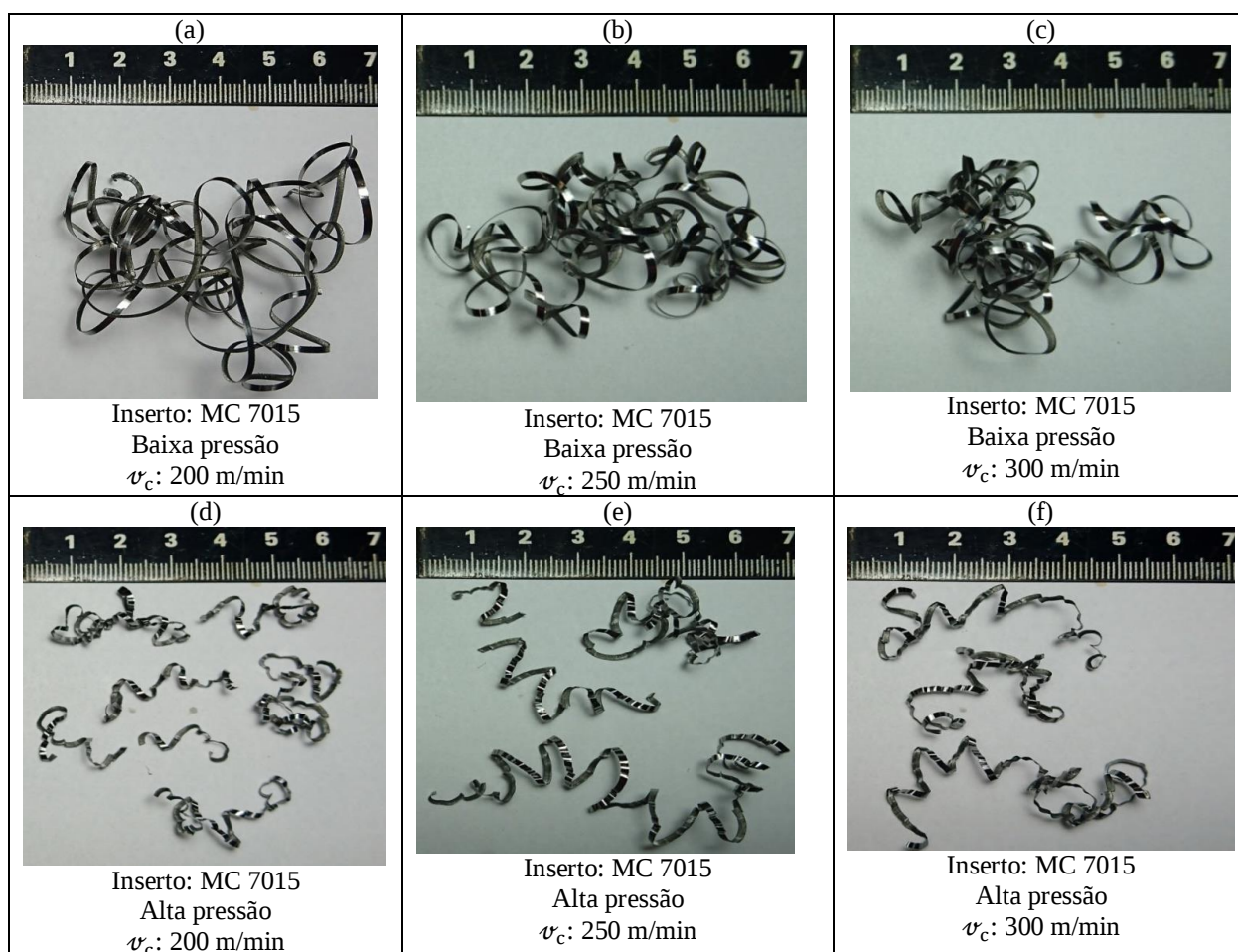


Figura 3. Formas dos cavacos gerados nos testes de torneamento.

4. CONCLUSÕES

Após a montagem de um sistema de lubri-refrigeração sob alta pressão e a realização de testes comparativos de torneamento do aço inoxidável supermartensítico com ferramentas de metal duro revestido com aplicação de fluido de corte sob baixa e alta pressão sob distintas velocidades de cortes, as seguintes conclusões podem ser extraídas:

- O sistema de lubri-refrigeração construído a partir de uma bomba de lavadora apresentou as seguintes características: pressão de 8 MPa, vazão experimental e teórica, respectivamente, 5 e 3,8 l/min e velocidade teórica do fluido de 101 m/s.
- Tanto as aplicações de fluido de corte sob baixa pressão quanto sob alta pressão não apresentaram influência estatística sobre a rugosidade (parâmetros R_a e R_z) da superfície torneada.
- A velocidade de corte apresentou influência estatística sobre a rugosidade R_z com uma contribuição de 98,12%.
- O fluido de corte aplicado sob baixa pressão produziu cavacos na forma de fita emaranhada, ao passo que sob alta pressão, a forma dos cavacos foi de arco solto para a velocidade de corte de 200 m/min e arco conectado para as velocidades de corte de 250 e 300 m/min.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais e ao Centro Universitário UNA pelo apoio à realização deste trabalho. Também agradecem às agências de fomento FAPEMIG, CAPES e CNPQ e à empresa Kampmann do Brasil Ltda.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR. 4287. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. 1 ed. Rio de Janeiro, 2002. 18 p.
- ASTM A743, *AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: Standard Specification for Castings, Iron-Chromium, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for General Application*. 1 ed., 2013. 8 p.
- DINIZ, A. E. MARCONDES, F. C. COPPINI, N. L. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013. 270 p.
- FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais, 1ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1970. 754 f.
- ISCAR (Org.). Catálogo de ferramentas e suporte porta-ferramenta da ISCAR. Disponível em: <<https://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=3603388&fnum=3656&mapp=IS&app=13&GFSTYP=M>>. Acesso em: 01 fev. 2018.
- ISO 3685, *INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: Tool-life testing with single-point turning tools*. 48 p. 1993.
- MACHADO, A. R. COELHO, R. T. ABRÃO, A. M. DA SILVA, M. B. Teoria da Usinagem dos Materiais. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 384 p. 2015.
- NAVES, V.T.G. DA SILVA, M.B. DA SILVA. F. J. *Evaluation of the effect of application of cutting fluid at high pressure on tool wear during turning operation of AISI 316 austenitic stainless steel*. *Wear*. p. 1201-1208. 29, Mar. 2013
- SANTOS, S. C. SALES, W. F. Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais. São Paulo: Artliber, 2007. 246 p.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

HIGH PRESSURE COOLING SYSTEM APPLIED TO TURNING OF SUPERMARTENSITIC STAINLESS STEEL

Deibe valgas dos santos^{1,2}, Alexandre Mendes Abrão², Michele Lisboa Silveira², Augusto Moura Martins²

¹Centro Universitário UMA, Av. Afonso Vaz de Melo, 640, Barreiro, Belo Horizonte, MG.

²Escola de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG.

deibe.santos@prof.una.br^{1,2}, abraão@demec.ufmg.br², michelesilveira1991@gmail.com², augusto.mmartins2@gmail.com²

Abstract. *Cutting fluids are used in machining process to provide lubrication and cooling during material removal. Using cutting fluid under high pressure offers additional advantages, namely, reduction of the chip-tool contact area and chip breakage. The aim of this work is the development of a high pressure cutting fluid system using a high-pressure washer pump for turning of supermartensitic stainless steel. Turning tests were carried out using different cutting speeds (200, 250 and 300 m/min), feed of 0.1 mm/rev and depth of cut of 0.7 mm and coated carbide inserts. The developed high pressure system presented pressure of 8 Mpa, flow rate of 5 l/min and theoretical fluid speed of 101m/s. Cutting fluid application features and cutting speed did not affect the roughness of the turned surface. Snarled ribbon chips were generated when cutting using fluid under low pressure, while loose arc chips were generated using cutting fluid under high pressure.*

Keywords: *Supermartensitic stainless steel, Chip shape, Surface roughness, Cutting fluid.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.