

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM NA INTEGRIDADE SUPERFICIAL DO AÇO BAIXA-LIGA CROMO-MOLIBDÊNIO

Alessandro Roger Rodrigues, roger@mat.feis.unesp.br
Hidekasu Matsumoto, hidekasu@dem.feis.unesp.br
Wyser José Yamakami, wyser@dem.feis.unesp.br
Rafael Gustavo da Rocha Paulo, rafaelgustavo@dem.feis.unesp.br
Cleiton Lazaro Fazolo de Assis, cffassis@aluno.feis.unesp.br
Daniel Iwao Suyama, disuyama@aluno.feis.unesp.br
Aldo Marcel Yoshida Rigatti, amyrigatti@aluno.feis.unesp.br

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, FEIS/UNESP, Av. Brasil Centro, 56 - CEP 15.385-000 - Ilha Solteira-SP

Resumo: Este trabalho investigou o efeito do fresamento de desbaste e acabamento na tensão residual, microestrutura e microdureza do aço baixa-liga cromo-molibdênio. Os testes foram realizados em um centro de usinagem vertical CNC, com potência de 15 CV e cabeçote de 10.000 rpm, adotando velocidade de corte convencional e alta velocidade de corte. O material utilizado nos ensaios, com dureza inicial de 230 HV, foi forjado a 1200 °C e resfriado ao ar lentamente. O fresamento de topo concordante foi realizado a seco e utilizou fresa Ø25 mm de duas arestas e insertos de metal duro revestidos com TiN/TiCN. Os resultados mostraram que o conceito de alta velocidade de corte causou menor impacto na integridade superficial da peça fresada. As tensões normais e tangenciais à direção do avanço diminuíram 40% e 20%, respectivamente. A microdureza foi reduzida em cerca de 40% no mínimo. Alterações na microdureza foram mais evidentes até 120 µm abaixo da superfície usinada para ambas as condições de usinagem. Não foram observadas por microscopia ótica alterações na microestrutura das peças na região próxima à superfície fresada.

Palavras-chave: fresamento, alta velocidade de corte, integridade superficial

1. INTRODUÇÃO

As peças obtidas por usinagem podem apresentar alterações ou danos em sua superfície e subsuperfície devido às altas taxas de cisalhamento envolvidas no processo. A exigência de qualidade das peças usinadas tem aumentado a cada dia, não só pelo aspecto funcional, mas também pela sua confiabilidade em serviço (Silva, 2002). Especialmente na indústria automotiva e aeronáutica, a fabricação desses componentes merece atenção maior, uma vez que alterações significativas na integridade superficial podem causar grandes acidentes e perdas de vidas humanas.

Em 1964, os pesquisadores Field e Kahles citaram pela primeira vez o termo integridade superficial, definindo-o como um conjunto de alterações na superfície das peças, causadas pela ação natural do processo de fabricação. Em 1971, na 21ª Assembléia Geral do CIRP (*College International pour la Recherche en Productique*), a integridade superficial tornou-se oficialmente reconhecida como um campo de pesquisa. Segundo Becker, Santos e Sales (2005), o conjunto de informações que permite caracterizar a natureza da camada superficial da peça pode ser obtido pela textura, macro/microestrutura, microdureza, resistência à fadiga, à tração, à corrosão, tensão residual e fluência, entre outros.

As primeiras pesquisas sobre usinagem com alta velocidade de corte (*High-Speed Cutting* - HSC) foram realizadas por Carl Salomon na Alemanha entre 1924 e 1931. Materiais não ferrosos como alumínio, cobre e bronze foram usinados com velocidades de até 16.500 m/min (Flom e Komanduri, 1989; Schützer e Schulz, 2003). Embora não haja consenso até os dias atuais, Salomon constatou que a temperatura de corte e a força de usinagem diminuíram com o aumento da velocidade de corte. Estes efeitos podem ser decisivos na integridade superficial do produto usinado.

HSC é um termo relativo que depende do material da peça e do mecanismo de formação de cavaco. De acordo com Flom e Komanduri (1989), alta velocidade de corte para um dado material pode ser definida como a velocidade acima da qual o cisalhamento localizado se desenvolve completamente na zona de cisalhamento primária. HSC gera cavacos contínuos para materiais dúcteis e segmentados para materiais de difícil usinabilidade. Sob o prisma prático e industrial, HSC é definida com base em intervalos de velocidade de corte, onde a velocidade é aumentada entre 5 a 10 vezes em relação aos valores assumidos convencionais e a taxa de avanço e profundidade de usinagem são diminuídas visando operações de acabamento e semi-acabamento (Schulz, 1999; Tönshoff et al 2001). Porém, esta definição prática da

usinagem HSC é imprecisa e abrangente. Chevrier et al (2003) e Sandvik Coromant (1999), por exemplo, indicam que a velocidade de corte em aços pode ser classificada como alta a partir de 300 m/min.

Apesar do progresso da usinagem HSC e de sua difusão no meio industrial, muitos resultados científicos na área de integridade superficial ainda não apresentaram conclusões satisfatórias. Blümke et al (2001) fresaram o aço 40CrMnMo7 esferoidizado e perlítico (180 e 260 HV) com até 4000 m/min e concluíram que o aumento da velocidade de corte aumentou a segmentação do cavaco e a microdureza. Sahn e Siems (2001) fresando o mesmo material afirmaram que o aumento da velocidade de corte causou maior segmentação do cavaco e diminuição da força de corte, que afetou menos a superfície usinada devido ao menor efeito mecânico na peça.

Field, Kahles e Koster (1989) declaram que as operações de fresamento tendem a gerar tensões residuais de compressão na superfície usinada da peça, mas os próprios autores confirmaram medições de tensão residual de tração ao fresar o aço AISI 4340. Chevrier et al (2003) obtiveram tensão residual de tração ao fresar o aço AISI 4140 (220 HV) com velocidade de corte de 1244 m/min. Biesinger et al (2001) afirmaram que não houve alteração do comportamento da microdureza na subsuperfície do aço 40CrMnMo7 com aumento da velocidade de corte no fresamento. Entretanto, Chakraborty et al (2008) constataram um aumento de 16% na microdureza superficial ao fresar a seco o aço AISI 4340. Após fresar um aço cromo-molibdênio normalizado (190 HV), Paulo (2008) constatou que a condição HSC introduziu menores níveis de tensão residual de tração e de microdureza na subsuperfície das peças.

O propósito desta pesquisa foi determinar o efeito conjunto da profundidade de usinagem, avanço e velocidade de corte, considerando condições de desbaste e acabamento, nas variáveis de integridade superficial tensão residual, microdureza e microestrutura da peça fresada.

2. MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS

Os ensaios foram realizados a seco em um centro de usinagem da marca Romi, modelo Discovery 560, com 15 CV de potência e rotação máxima de 10.000 rpm. Foi empregado o fresamento de topo concordante e percurso linear da ferramenta, utilizando-se uma fresa \varnothing 25 mm com dois insertos de metal duro (Classe ISO P25) revestidos de TiN/TiCN, fabricados pela Sandvik Coromant (R390-11 T3 08M-PM 4030). Os parâmetros de corte apresentados na Tabela 1 foram estabelecidos com base em Chevrier et al (2003) e Sandvik Coromant (1999).

Tabela 1. Parâmetros de usinagem utilizados nos ensaios de fresamento.

Parâmetro	Unidade	Condições de corte	
		Convencional (Desbaste)	HSC (Acabamento)
penetração de trabalho (a_c)	mm	5,0	5,0
profundidade de usinagem (a_p)	mm	1,5	1,0
avanço por dente (f_z)	mm/z	0,15	0,08
velocidade de corte (v_c)	m/min	100	400
taxa de remoção de material (Q)	cm ³ /min	1,6	2,3

A tensão residual no estado plano foi medida a 5 μ m abaixo da superfície fresada aplicando-se o método não-destrutivo de difração de raio-X $\sin^2\psi$. Os cálculos para a determinação das tensões residuais consideraram a variação do espaçamento interplanar $\{d_{\phi\psi}\}$, o ângulo relativo à maior tensão principal (ϕ) e a direção de deformação (ψ). Como a deformação ocorre na direção do par $\langle\phi,\psi\rangle$, as tensões residuais foram determinadas com base nas quantidades elásticas do módulo de elasticidade ($E=205$ MPa) e do coeficiente de poisson ($\nu=0,29$) do material.

A microdureza foi obtida por um sistema de indentação Carl Zeiss acoplado a um microscópio ótico Neophot 21. As medições na escala Vickers foram realizadas a temperatura ambiente e basearam-se na norma ASTM E 384-89, com carga de 0,098 N (10 gf) e tempo de aplicação de 15 s. Para eliminar o efeito da microestrutura, as indentações foram realizadas apenas no microconstituente ferrita, a uma profundidade de até 300 μ m abaixo da superfície fresada.

O material empregado nos ensaios de fresamento foi o aço baixa-liga cromo-molibdênio (230 HV), utilizado na fabricação de engrenagens, embreagens e freios. Fornecidos por uma empresa do setor automotivo, os corpos de prova com dimensões finais \varnothing 70 x 15,5 mm foram inicialmente cortados na forma de tarugos, pré-aquecidos em forno de indução, forjados a quente (1200 °C) e resfriados ao ar lentamente. Os ensaios de fresamento visaram simular a usinagem de desbaste e acabamento de cavidades e contornos na face dos componentes. A Tabela 2 exhibe a composição química do material utilizado neste trabalho e a Figura 1 mostra as dimensões e a geometria dos corpos de prova na condição bruta e “como recebido” (pré-usinada).

Tabela 2. Composição química do material dos corpos de prova (% em peso).

C	Mn	Cr	Mo	Si	P	S
0,23 - 0,28	0,90 - 1,30	0,35 - 0,70	0,10 - 0,20	0,15 - 0,35	0,25 máx	0,02 - 0,04

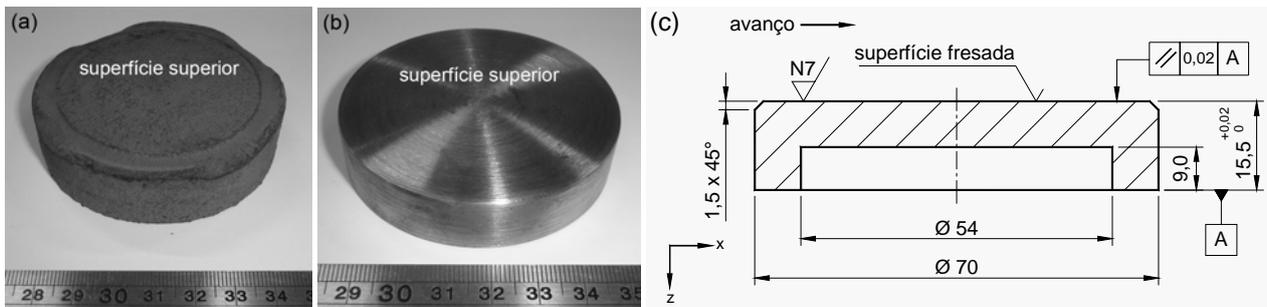


Figura 1. Formas das peças: (a) bruto, (b) “como recebido” e (c) dimensões finais para os testes de fresamento.

Para a caracterização microestrutural, corpos de prova fresados e na condição “como recebido” foram cortados na seção transversal com disco abrasivo, embutidos em resina poliéster, lixados com granulometria 120, 220, 400, 600 e 1000, polidos com alumina 1 μm e atacados com reagente Nital 2% por imersão em vidro relógio durante 20 s. As imagens micrográficas foram obtidas por um microscópio ótico, marca Carl Zeiss, modelo Neophot 21.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pode ser observado na Fig. 2a que a microdureza do corpo de prova na condição “como recebido” tendeu a aumentar na região próxima à superfície. Considerando um desvio médio estatístico de 10,9%, pode-se constatar que a microdureza elevou-se em cerca de 50 HV em uma faixa de 40 μm de profundidade, porém dentro do desvio estatístico relativo à dispersão das medições.

Ao examinar as curvas relativas às condições de usinagem, observa-se mais claramente um aumento da microdureza na região mais próxima à superfície fresada. Ambas as condições de usinagem convencional (Fig. 2b) e HSC (Fig. 2c) causaram modificações evidentes no perfil de microdureza. Mesmo considerando os desvios médios estatísticos de 6,1 e 7,0%, respectivamente para as condições de usinagem convencional e HSC, foi possível confirmar um aumento médio na microdureza em torno de 14%. De forma similar à da condição “como recebido” (Fig. 2a), a região mais afetada pelas condições de fresamento encontra-se na profundidade de até 40 μm abaixo da superfície fresada. Na faixa entre 40 e 120 μm , os perfis de microdureza apresentam-se menos distintos e abaixo de 120 μm , as medidas para todos os corpos de prova e condições de usinagem podem ser assumidas estatisticamente iguais.

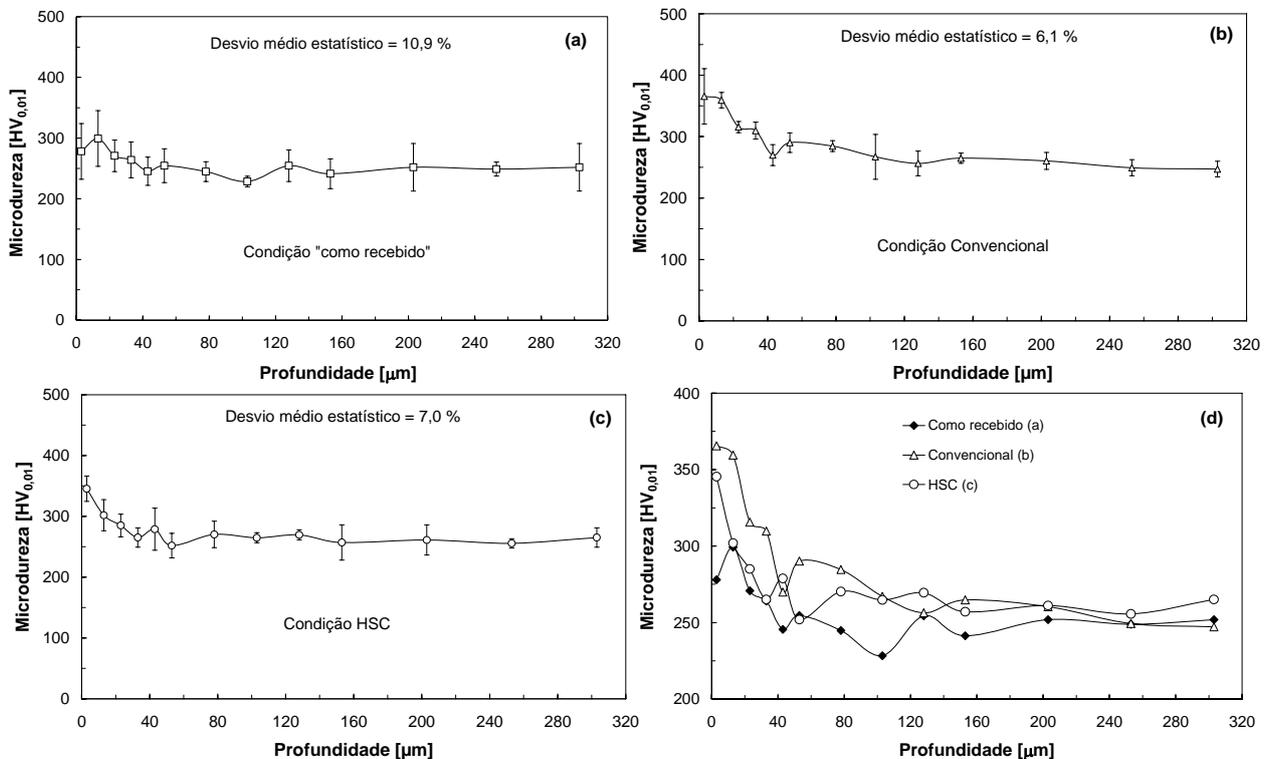


Figura 2. Perfis de microdureza dos corpos de prova fresados e na condição “como recebido”.

O resultado final, apresentado na Fig. 2d, sintetiza o efeito conjunto de todas as condições de usinagem na microdureza dos corpos de prova. Considerando a totalidade dos pontos de microdureza medidos (profundidade de 300 μm), as diferenças percentuais apontam que a condição de usinagem HSC causou um aumento da microdureza 40% menor que o aumento proporcionado pela condição de usinagem assumida convencional. Até a profundidade de aproximadamente 120 μm , onde as microdurezas apresentaram perfis mais distintos, a queda dos níveis relativos à usinagem HSC foi ainda maior, 47%. Por fim, considerando a profundidade de 40 μm , a redução média da microdureza alcançou 55%. Este resultado tem uma relação direta com as medições de tensão residual nos corpos de prova.

A avaliação do comportamento da tensão residual residuou na determinação do tipo e magnitude desta variável de integridade superficial. A Figura 3 mostra os principais resultados a cerca das tensões residuais encontradas nos corpos de prova.

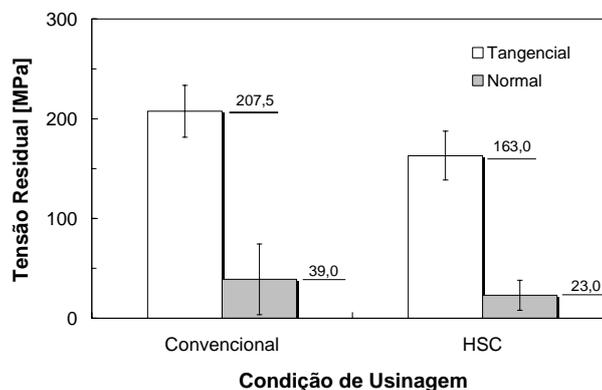


Figura 3. Tensão residual dos corpos de prova fresados na condição convencional e em alta velocidade de corte.

O primeiro resultado extraído da Fig. 3 refere-se ao tipo de tensão residual observado nos corpos de prova. O processo de fresamento de topo introduziu tensões residuais de tração em ambas as direções tangencial e normal à direção de avanço da ferramenta de corte, para as duas condições de usinagem investigadas neste trabalho. A usinagem induziu níveis de tensão residual nas superfícies fresadas devido ao efeito combinado entre as deformações causadas pelos efeitos mecânico e térmico provenientes do processo de corte do material.

O efeito mecânico induz tensões residuais de compressão na superfície usinada devido à ação da subsuperfície deformada elasticamente em restringir a superfície deformada plasticamente pela ferramenta de corte. O efeito térmico, por sua vez, gera tensões residuais de tração por causa da contração superficial e reação da subsuperfície devido ao gradiente de temperatura e à diferença na taxa de resfriamento entre a superfície e subsuperfície do corpo de prova.

As tensões residuais medidas neste trabalho para ambas as condições de usinagem indicam que o efeito térmico sobrepôs o efeito mecânico, pelo menos na superfície dos corpos de prova fresados. A ação dominante do calor na zona de corte não impede, por exemplo, que tensões residuais de compressão tenham sido induzidas em regiões mais profundas abaixo da superfície fresada.

O fresamento a seco e a maior taxa de deformação causada pela maior velocidade de corte da condição HSC causaram uma elevação da temperatura na zona de corte. Entretanto, menos calor afetou a superfície fresada dado que o corte intermitente e a velocidade de corte elevada diminuíram o tempo de contato peça-ferramenta para alcançar o estado permanente de temperatura. Dessa forma, o calor foi dissipado juntamente com os cavacos, devido à maior taxa de remoção de material proporcionada pela condição de usinagem HSC. Mesmo apresentando maiores taxas de deformação, o comportamento do calor na usinagem HSC fez reduzir em cerca de 20% o nível de tensão residual de tração tangente à direção de avanço, em comparação à condição de usinagem convencional.

Analogamente, tensões residuais de tração foram também medidas na direção normal à de avanço da ferramenta de corte. Estas magnitudes de tensão foram cerca de 83% menores que as tensões tangenciais e provavelmente originaram-se das componentes cisalhantes derivadas das tensões tangenciais e do efeito térmico já mencionado anteriormente. Apesar do elevado desvio estatístico associado à condição de usinagem convencional, o fresamento HSC gerou um nível de tensão residual de tração normal à direção de avanço 40% menor em comparação à usinagem convencional.

Visando correlacionar os resultados quantitativos de microdureza e tensão residual às imagens micrográficas dos corpos de prova fresados e na condição “como recebido”, a Fig. 4 apresenta fotografias das microestruturas das peças nas regiões superficial e subsuperficial.

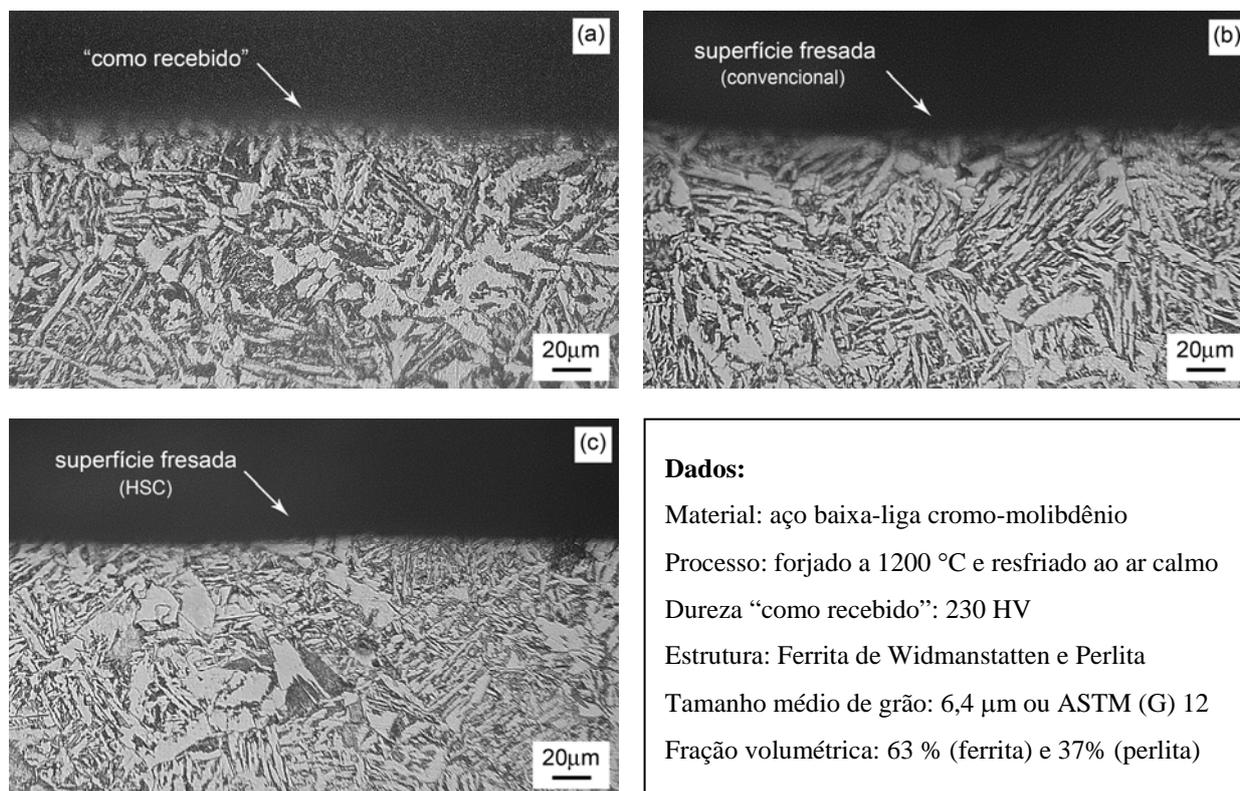


Figura 4. Micrografias dos corpos de prova fresados e na condição “como recebido” (ataque Nital 2%).

Pelo exame da Fig. 4, nota-se que a microestrutura dos corpos de prova apresentou uma morfologia alongada, caracterizando uma estrutura acicular predominante, com ocorrências de grãos equiaxiais em regiões isoladas. Devido à taxa de resfriamento ter ocorrido relativamente distante das condições de equilíbrio (resfriamento ao ar ao invés de no forno), a microestrutura é formada de ferrita de Widmanstatten na cor clara e perlita na cor escura. Aplicando as normas ASTM E 112-95 e E 562-92 para metalografia quantitativa, foi possível constatar a predominância de ferrita (63%) e o tamanho reduzido de grão (~6,4 µm). Estes resultados são compatíveis com a dureza inicial dos corpos de prova já apresentada previamente (230 HV).

Apesar da detalhada caracterização microestrutural das regiões próximas às superfícies usinadas, as imagens metalográficas revelam, em princípio, que ambas as condições de usinagem não causaram alterações perceptíveis na morfologia da microestrutura dos corpos de prova, tampouco transformações de fase nas zonas mais próximas às superfícies. Este fato sinaliza que os resultados quantitativos de microdureza e tensão residual medidos decorreram de mudanças microestruturais no nível de discordâncias, por exemplo, ou que a microscopia ótica empregada como ferramenta de análise não foi capaz de identificar níveis de deformação da microestrutura, provavelmente mais sensíveis na direção do avanço da ferramenta de corte. A próxima fase da investigação qualitativa da microestrutura é empregar microscopia eletrônica de varredura, por permitir maiores aumentos e profundidade de foco, sobretudo nas bordas (superfícies fresadas).

4. CONCLUSÕES

O fresamento do aço baixa-liga cromo-molibdênio (230 HV), mesmo em condições menos severas, pode causar mudanças na integridade superficial. Ambas as condições de usinagem modificaram o perfil de microdureza abaixo da superfície fresada em até 40 µm de profundidade. A usinagem HSC aumentou a microdureza em um nível 40% menor que o da condição convencional.

Tensões residuais de tração foram medidas para ambas as condições de fresamento, entretanto, a usinagem HSC introduziu níveis mais baixos que os da usinagem convencional (entre 20 e 40% menor). As principais causas da ocorrência de tensões de tração estão relacionadas à provável sobreposição do efeito térmico em relação ao mecânico ocorridos na zona de corte.

Não foi possível visualizar por microscopia ótica microestruturas deformadas ou transformações de fase nos corpos de prova, as quais explicariam as variações quantitativas da microdureza e da tensão residual. As causas destas variações podem estar relacionadas às discordâncias ou deformações sensíveis na direção do avanço da ferramenta de corte, que podem ser verificadas por microscopia eletrônica de varredura.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão de auxílio financeiro e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte na forma de bolsa de apoio técnico.

6. REFERÊNCIAS

- Becker, M., Santos, S.C. e Sales, W.F., 2005, "Integridade Superficial em Usinagem", In: Vários Autores, "Tecnologias Avançadas de Manufatura", Ed. Cubo Multimídia, Jaboticabal, Brasil, pp. 105-123.
- Biesinger, F., Thiel, M., Schulze, V., Vöhringer, O., Krempe, M. and Wendt, U., 2001, "Characterization of Surface and Subsurface Regions of HSC-Milled Steel", In: Schulz, H. (Ed.), "Scientific Fundamentals of HSC", Ed. Druckhaus, Munich, Germany, pp. 137-149.
- Blümke, R., Sahn, A. and Müller, C., 2001, "Influence of Heat Treatment on Chip Formation in High Speed Milling", In: Schulz, H. (Ed.), "Scientific Fundamentals of HSC", Ed. Druckhaus, Munich, Germany, pp. 43-52.
- Chakraborty, P., Asfour, S., Cho, S., Onar, A. and Lynn, M., 2008, "Modeling Tool Wear Progression by Using Fixed Effects Modeling Technique When End Milling AISI 4340 Steel", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 205, pp. 190-202.
- Chevrier, P., Tidu, A., Bolle, B., Cezard, P. and Tinnes, J.P., 2003, "Investigation of Surface Integrity in High Speed End Milling of a Low Alloyed Steel", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, pp. 1135-1142.
- Field, M., Kahles, J.F., Koster, W.P., 1989, "Surface Finish and Surface Integrity", In: Davis, J.R. (Ed.), "ASM Metals Handbook: Machining", Ohio, United States, Vol. 16, pp. 19-36.
- Flom, D.G. and Komanduri, R., 1989, "High Speed Machining", In: Davis, J.R. (Ed.), "ASM Metals Handbook: Machining", Ohio, United States, Vol. 16, pp. 597-606.
- Paulo, R.G.R., 2008, "Avaliação da Integridade Superficial e Usinabilidade de Engrenagens Forjadas Utilizando Fresamento com Alta Velocidade de Corte", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil.
- Sahn, A. and Siems, S., 2001, "Influence of Chip Segmentation on Cutting Force", In: Schulz, H. (Ed.), "Scientific Fundamentals of HSC", Ed. Druckhaus, Munich, Germany, pp. 151-160.
- Sandvik Coromant, 1999, "Fabricação de Moldes e Matrizes - Guia de Aplicação", Sandvik, São Paulo, Brazil, 208 p.
- Schulz, H., 1999, "The History of High-Speed Machining", Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Production Engineering, Opatija, Croatia, pp. 2-12.
- Schützer, K. and Schulz, H., 2003, "Histórico da Usinagem com Altíssima Velocidade até os Dias Atuais", In: Santos, A.V. (Ed.), "Usinagem em Altíssimas Velocidades", Ed. Érica, São Paulo, Brazil, pp. 13-18.
- Silva, L.R., 2002, "Estudo da Geometria da Aresta de Corte de Ferramentas Aplicadas ao Torneamento de Superligas à Base de Níquel com Alta Velocidade de Corte", Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- Tönshoff, H.K., Friemuth, T., Andrae, P. and Amor, R.B., 2001, "High-Speed or High-Performance Cutting - A Comparison of New Machining Technologies", Production Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 5-8.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

MILLING CONDITION INFLUENCE ON THE SURFACE INTEGRITY OF LOW-ALLOY CROMIUM-MOLIBDENIUM STEEL

Alessandro Roger Rodrigues, roger@mat.feis.unesp.br
Hidekasu Matsumoto, hidekasu@dem.feis.unesp.br
Wysler José Yamakami, wyser@dem.feis.unesp.br
Rafael Gustavo da Rocha Paulo, rafaelgustavo@dem.feis.unesp.br
Cleiton Lazaro Fazolo de Assis, clfassis@aluno.feis.unesp.br
Daniel Iwao Suyama, disuyama@aluno.feis.unesp.br
Aldo Marcel Yoshida Rigatti, amyrigatti@aluno.feis.unesp.br

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, FEIS/UNESP, Av. Brasil Centro, 56 - CEP 15.385-000 - Ilha Solteira-SP

Abstract: *This work evaluated the milling conditions effects on the residual stress, microstructure and microhardness of low-alloy chromium-molibdenium steel. The tests were carried out by considering conventional cutting speed and high-speed cutting. A CNC machining center with 15 CV power and 10,000 rpm spindle rotation was employed in milling work. The workpiece material (230 HV) was hot forged at 1200 °C e air cooled. A 25 mm diameter endmill with two cemented carbide inserts coated with double TiN/TiCN layers were used for end milling operation. The results showed that HSC was more propitious for the workpiece surface integrity than conventional machining. The biaxial components of tensile residual stress tangent and normal to the feed direction decreased between 20 and 40%, respectively. For both cutting conditions the microhardness affected up to 120 μm beneath the machined surface, however the HSC increased the microhardness at least 40% less than conventional cutting parameters. Microstructural alterations in the workpiece material were not observed near the milled surface by using optical microscopy.*

Keywords: *milling, high-speed cutting, surface integrity*