

Integridade superficial resultante de diferentes processos de usinagem

Surface integrity after different machining process

Rodrigo Panosso Zeilmann

Prof. Dr. Eng. Mecânica, Universidade de Caxias do Sul
Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130, 95070-560, Caxias do Sul, RS, Brasil
rpzeilma@ucs.br

Fernando Moreira Bordin

Mestrando, Universidade de Caxias do Sul
Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130, 95070-560, Caxias do Sul, RS, Brasil
fmbordin@ucs.br

Mariana Czarnobay Zanotto

Bolsista, Universidade de Caxias do Sul
Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130, 95070-560, Caxias do Sul, RS, Brasil
mczanotto@ucs.br

Rafael de Matos Soares

Bolsista, Universidade de Caxias do Sul
Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130, 95070-560, Caxias do Sul, RS, Brasil
rmsoares@ucs.br

Tiago Vacaro

Bolsista, Universidade de Caxias do Sul
Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130, 95070-560, Caxias do Sul, RS, Brasil
tvacaro@ucs.br

Resumo

Dentre os fatores que exercem influência sobre o desempenho dos componentes mecânicos, destacam-se o material utilizado e as condições da superfície. Durante o processo de usinagem, a superfície gerada pode sofrer alterações, as quais têm influência sobre as propriedades do material. Devido à variedade de processos de usinagem, é fundamental a avaliação dos diferentes processos, de modo a selecionar o mais adequado para cada operação de fabricação. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de diferentes processos sobre a integridade da superfície gerada, utilizando dois processos convencionais: furação e fresamento, e um não-convencional: a eletroerosão. Na realização dos ensaios de furação e fresamento foram utilizadas ferramentas inteiriças de metal-duro, e na usinagem por eletroerosão foi utilizado um eletrodo de cobre. O material usinado foi o aço ABNT 1045. Os resultados encontrados demonstraram maiores alterações na superfície

Abstract

Among the factors that influence the performance of mechanical components, stand the material and surface conditions. During the machining process, the surface generated can be altered, which have influence on the properties of the material. Due to the variety of machining processes, it is necessary to evaluate the different processes in order to select the most appropriate for each manufacturing operation. Thus, the goal of this work was to evaluate the influence of different processes in the integrity of the generated surface using two conventional processes: drilling and milling, and one unconventional: electrical discharge machining (EDM). In drilling and milling tests were used carbide tools, and in EDM was used a copper electrode. The machined material was ABNT 1045 steel. The results showed bigger changes in the surface generated by the EDM process than those caused by the conventional processes.

gerada pelo processo de eletroerosão do que as provocadas pelos processos convencionais.

Palavras-chave: furação, fresamento, EDM, propriedades dos materiais, seleção de processos.

Key words: drilling, milling, EDM, properties of materials, process selection.

1. Introdução

A vida útil de uma peça produzida a partir de processos de usinagem depende fortemente da sua condição superficial (Farias, 2009). Por meio de uma adequada caracterização da qualidade superficial e da compreensão dos elementos que exercem influência sobre a mesma, é possível melhorar o desempenho dos componentes fabricados, evitar falhas e reduzir os custos globais de manufatura.

A superfície de uma peça tem dois aspectos importantes que devem ser definidos e controlados. O primeiro aspecto refere-se às irregularidades geométricas na superfície topográfica, e o segundo às alterações metalúrgicas da camada subsuperficial (Oliveira, 2006). Durante o processo de usinagem, a superfície gerada sofre efeitos mecânicos e térmicos que podem alterar de forma significativa as características da superfície e abaixo da mesma (Hioki, 2006; Whitehouse, 2000). Tais alterações geram diferentes propriedades tecnológicas que exercem grande influência no desempenho de uma peça técnica, principalmente no que diz respeito a sua vida útil (Basavarajappa *et al.*, 2007; Javidi *et al.*, 2008). A intensidade desses efeitos depende da interação da energia mecânica e térmica gerada durante o processo de remoção de material e das propriedades do material da peça de trabalho (Rosario, 2006). Essa interação das energias, por sua vez, é influenciada por diversos parâmetros relativos ao processo de usinagem empregado (Dabade *et al.*, 2007).

Consequentemente, a escolha adequada do processo de usinagem é também um fator decisivo na fabricação de um produto. Determinar um plano de execução, com base em requisitos técnicos e econômicos, de forma a deixar os produtos de acordo com as especificações necessárias e viáveis em termos de custo, é de extrema importância frente a grande concorrência vivida pelos meios produtivos na atualidade (Santos, 2001). Para tanto, existem inúmeros processos de usinagem, os quais são divididos em processos convencionais, onde a remoção de material ocorre com o emprego de uma ferramenta, seja ela de geometria definida ou não, e os processos não-convencionais, nos quais a remoção de material se dá por meio de outros mecanismos, como por exemplo descargas elétricas, como é o caso do processo de eletroerosão (König e Klocke, 2002).

Frente a este contexto, é de grande importância avaliar e compreender as diversas particularidades de cada processo de usinagem quanto aos seus efeitos sobre a qualidade superficial, tendo em vista que a superfície exerce grande influência sobre o desempenho dos produtos usinados. Desta forma, o presente trabalho tem por objetivo apresentar os efeitos sobre a qualidade superficial de cavidades cilíndricas geradas por três diferentes processos de usinagem: dois convencionais, furação e fresamento; e um não-convencional, a eletroerosão por penetração.

2. Materiais e Métodos

O material dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios foi o aço ABNT 1045, no estado normalizado. Para a realização dos ensaios experimentais de furação e fresamento foi utilizado um Centro de Usinagem Okuma,

modelo Ace Center MB – 46 VAE, com rotação máxima no eixo-árvore de 15.000 rpm e potência de 18,5 kW. Os ensaios de eletroerosão por penetração foram realizados em uma máquina Engemaq, modelo EDM 440 NC.

Os três processos foram aplicados na geração de cavidades cilíndricas (furos não-passantes) com diâmetro de 12 mm e profundidade de 8 mm. O processo de furação foi realizado em cheio e a seco, com o emprego de uma broca helicoidal inteiriça de metal-duro K10, de dois gumes e revestida com nitreto de titânio (TiN). A ferramenta foi fixada em um cone térmico com uma relação comprimento/diâmetro (l/d) de 6. Para o processo de fresamento foi utilizada uma fresa de topo reto, não-revestida, com dois gumes e diâmetro de 10 mm, a qual foi fixada em um cone térmico com uma relação l/d de 4. A estratégia utilizada foi a de fresamento helicoidal, e para tanto foram realizados pré-furos com diâmetro de 10 mm. O corte se deu no sentido concordante, sem a aplicação de fluido lubrificadorrefrigerante. Nos ensaios de eletroerosão os corpos-de-prova foram preparados com pré-furos de diâmetro de 10 mm. O eletrodo utilizado foi uma barra com diâmetro de 12 mm de cobre eletrolítico. O processo ocorreu em ciclos intermitentes de 3 segundos de erosão, com recuo de 1 mm por ciclo e recuo total para fora do furo a cada 10 ciclos completos. O corpo-de-prova ficou submerso no líquido dielétrico Microcorte 102-A, produzido pela Micro Química Ltda.

Em cada um dos processos ensaiados foram utilizadas três configurações de parâmetros de corte, apresentadas na Tabela 1. Para cada condição de teste foi realizado um furo e uma réplica, perfazendo um total de 18 ensaios.

Tabela 1: Parâmetros de corte utilizados nos ensaios experimentais.

Furação				
Parâmetros	Velocidade de corte v_c [m/min]		Avanço f [mm]	
Fu-1	100		0,1	
Fu-2	100		0,2	
Fu-3	150		0,1	
Fresamento helicoidal				
Parâmetros	Velocidade de corte v_c [m/min]	Avanço f [mm]	Profundidade axial a_p [mm]	Profundidade radial a_e [mm]
Fr-1	100	0,2	1	1
Fr-2	100	0,4		
Fr-3	150	0,2		
Eletroerosão				
Parâmetros	Corrente I [A]	Tempo de descarga TON [μ s]		Tempo de interrupção TOFF [μ s]
EDM-1	1,5	20		7
EDM-2	6	100		55
EDM-3	18	300		225

Para a avaliação das superfícies usinadas foram analisadas a rugosidade, a textura, a integridade das subsuperfícies, além da medição de microdureza das mesmas. As medidas de rugosidade foram obtidas com

o uso de um rugosímetro Taylor-Hobson, modelo Surtronic 3+. Os parâmetros avaliados foram R_a e R_y , e as medições se deram no meio do comprimento axial dos furos. Para melhor compreender os valores obtidos pelas análises de rugosidade foi realizada uma avaliação óptica da textura da parede dos furos, por meio de imagens com ampliação de 100x. Na realização das análises de integridade das subsuperfícies, os corpos-de-prova foram cortados em seções transversais, e as imagens das bordas foram obtidas com a utilização de um microscópio óptico Nikon, modelo Epiphot 200, com capacidade de ampliação de 1000x. Também foram realizadas medições de microdureza Vickers das regiões próximas à superfície, sendo empregado um microdurômetro Shimadzu, modelo HMV-2, utilizando-se uma carga de 0,025 kg. É importante salientar que todas as medidas foram realizadas em regiões perlíticas, as quais apresentaram uma dureza média de 260 HV sem a presença de qualquer efeito de usinagem. O procedimento de medição foi realizado conforme a norma NBR NM 188-1.

3. Resultados e Discussão

Como citado anteriormente, para cada condição de teste foi realizado um furo e uma réplica. Como os resultados das réplicas não apresentaram variações significativas, são apresentados aqui os resultados relativos ao primeiro furo realizado em cada condição de teste, de modo a facilitar a análise dos resultados, ao não incluir na mesma o desgaste das ferramentas. A Figura 1 apresenta o gráfico com os valores de rugosidade R_a e R_y medidos na região final dos furos realizados pelos diferentes processos analisados, e também os valores referentes aos diferentes parâmetros empregados em cada processo.

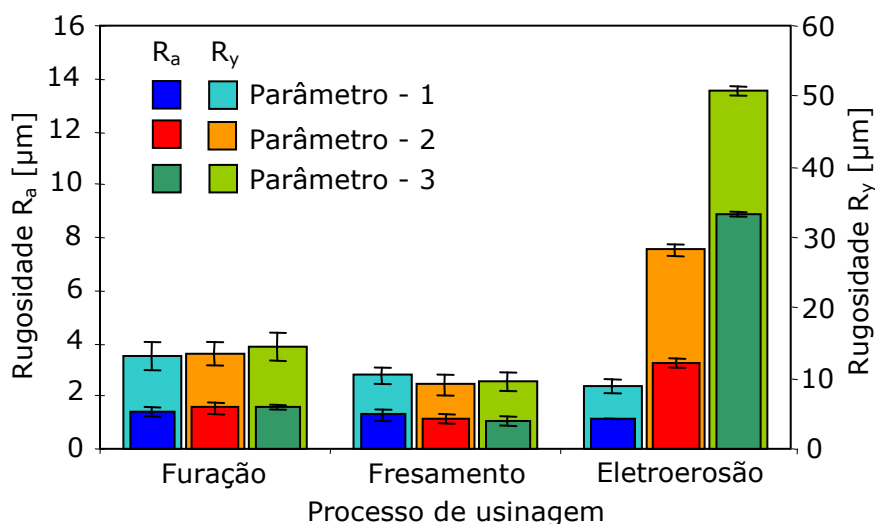


Figura 1: Resultados de rugosidade da região final dos furos realizados pelos diferentes processos.

A análise do gráfico mostra que os valores de rugosidade obtidos pelos processos de furação e fresamento apresentaram diferenças entre ambos. O processo de furação registrou valores ligeiramente superiores aos do fresamento, possivelmente devido ao fato da broca apresentar maior condição de atrito com as paredes dos furos. Isso se deve à presença das guias, que não possuem função de corte, e do contato direto do cavaco gerado com as paredes do furo.

Pode-se observar também que não houve diferenças significativas quanto aos diferentes parâmetros de corte empregados. Entretanto, é importante salientar que os resultados apresentados correspondem ao primeiro furo gerado, no qual a ferramenta utilizada encontrava-se em estado novo, e que tais valores tendem a apresentar variações com o tempo, devido às modificações que ocorrem nos gumes das ferramentas em decorrência das solicitações a que são submetidas durante o corte.

Analisando os resultados obtidos por eletroerosão é possível observar que há um acréscimo gradativo e mais significativo nos valores de rugosidade com o aumento da severidade dos parâmetros de usinagem. Segundo Lee *et al.* (2004) a rugosidade da superfície usinada por eletroerosão está associada com a distribuição das crateras formadas pelas descargas elétricas, e sua magnitude aumenta de acordo com a severidade dos parâmetros utilizados.

A análise da topografia superficial foi complementada através da análise das texturas na região final dos furos realizados em cada condição de teste, como mostra a Figura 2. Através da análise das texturas geradas por cada processo é possível compreender qualitativamente os valores obtidos de rugosidade.

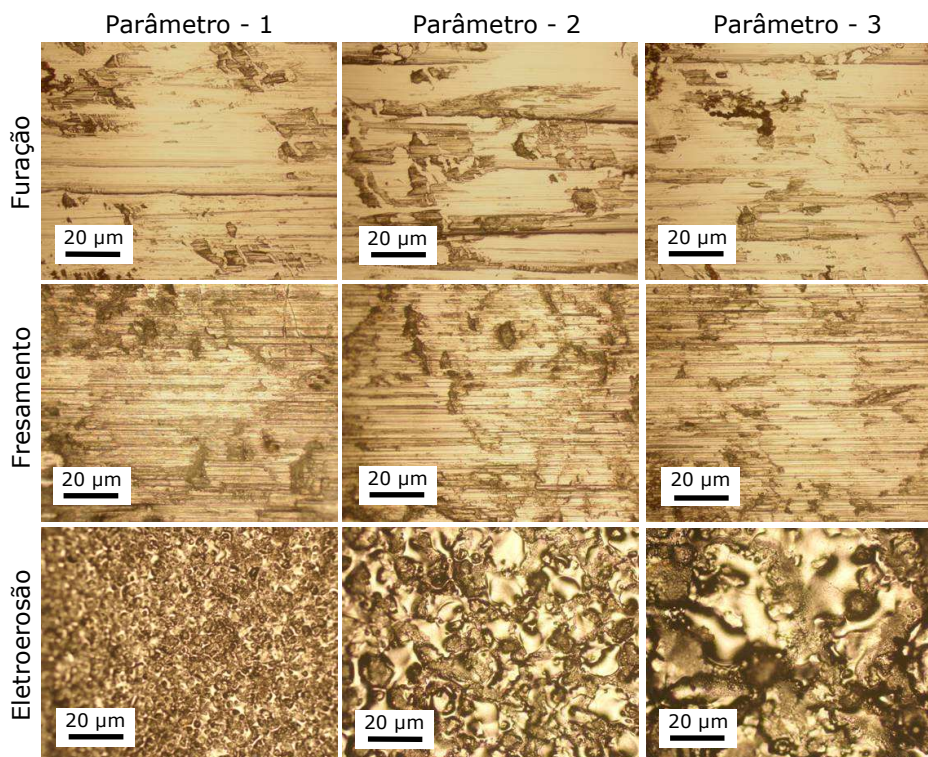


Figura 2: Textura obtida em cada processo de usinagem, para os três parâmetros de corte ensaiados.

Comprovando os resultados de rugosidade, é possível observar que as superfícies usinadas por furação e fresamento não apresentaram mudanças significativas com a variação dos parâmetros de corte. Já as superfícies produzidas por eletroerosão apresentaram a formação de diversas microcrateras distribuídas uniformemente sobre a superfície, as quais se ampliam com o aumento dos parâmetros.

Em decorrência da crescente exigência sobre as propriedades mecânicas de peças fabricadas por usinagem, o enfoque dado à topografia deve ser estendido às transformações que ocorrem nas camadas abaixo da

superfície. As imagens das microestruturas, bem como os resultados de deformações plásticas e microdureza obtidos na região final dos furos realizados pelo processo de furação com os três diferentes parâmetros de corte são mostrados na Figura 3.

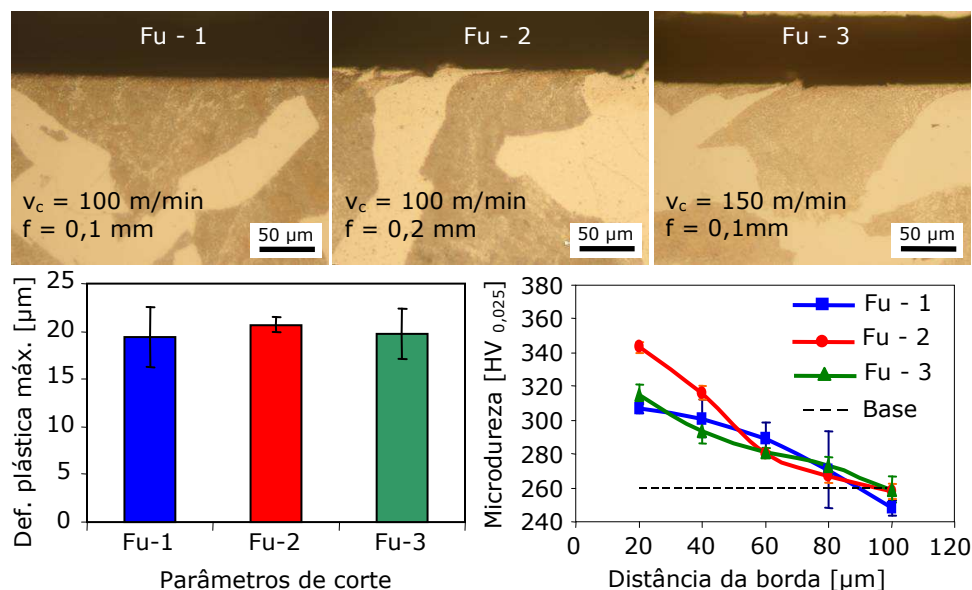


Figura 3: Resultados da análise metalográfica das subsuperfícies geradas pelo processo de furação.

Observando as microestruturas das subsuperfície geradas pelos três diferentes parâmetros de corte ensaiados, é possível identificar a presença de deformações plásticas caracterizadas pelo deslocamento dos grãos no sentido de corte do material. Analisando o gráfico que apresenta os valores de deformação plástica máxima, observa-se que não há variações em relação aos diferentes parâmetros ensaiados. Pela análise de microdureza é possível observar que os valores diminuem conforme aumenta a distância em relação à borda, tendendo à dureza do material de base. Este aumento acentuado de microdureza na subsuperfície se deve às deformações plásticas presentes na região avaliada.

A Figura 4 apresenta as micrografias das bordas e os resultados de deformações plásticas e microdureza obtidos na região final dos furos realizados pelo processo de fresamento com os três diferentes parâmetros de corte.

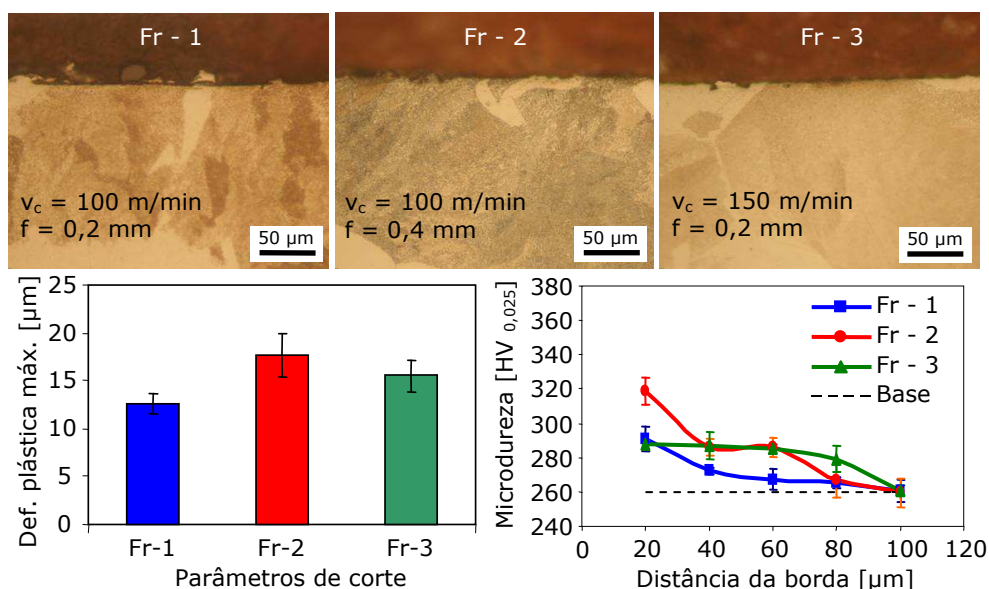


Figura 4: Resultados da análise metalográfica das subsuperfícies geradas pelo processo de fresamento.

Para as subsuperfícies fresadas, de forma semelhante às usinadas por furação, somente foi possível identificar a presença de deformações plásticas acompanhadas pelo aumento na microdureza. Analisando o gráfico que apresenta os valores de máxima camada afeta, é possível observar que, com o aumento do avanço de corte de 0,2 para 0,4 mm, há um acréscimo na cada deformada plasticamente mais acentuado que o acréscimo apresentado pelo aumento na velocidade de corte. Tal resultado conduz à hipótese de que no fresamento tangencial o avanço de corte apresenta maior influência no surgimento de tais deformações que a velocidade de corte. Isso pode ser explicado pelo fato de que os principais fatores atuantes sobre o surgimento de deformações plásticas são os esforços durante o cisalhamento do material e o calor gerado e conduzido para a peça. Desta forma, o aumento no avanço de corte foi acompanhado pelo acréscimo nos esforços e, como consequência, houve o aumento na camada deformada. Entretanto, o acréscimo na velocidade de corte favoreceu a dissipação do calor gerado no corte para o cavaco, resultando na redução do fluxo de calor para a peça, atenuando desta forma as deformações geradas pelo aumento localizado da temperatura (Basavarajappa *et al.*, 2007).

A Figura 5 apresenta as micrografias das bordas e os resultados de camada afetada e microdureza obtidos na região final dos furos realizados pelo processo de eletroerosão com os três diferentes parâmetros de corte. A camada afetada considerada é a distância a partir da superfície até a região em que não são mais observadas alterações metalúrgicas no material.

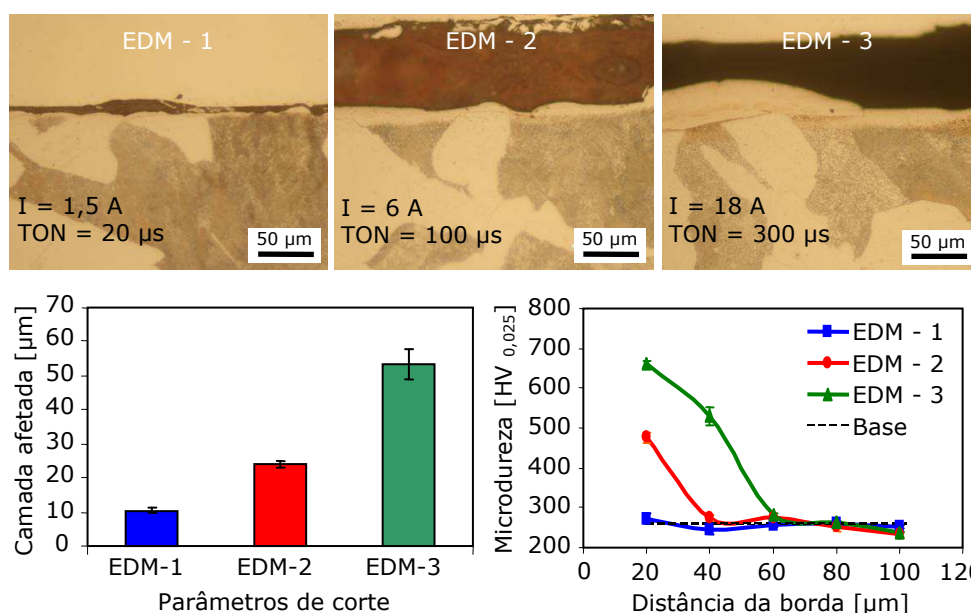


Figura 5: Resultados da análise metalográfica das subsuperfícies geradas pelo processo de eletroerosão.

Por meio da análise das microestruturas das subsuperfícies usinadas por eletroerosão, é possível identificar a formação da camada branca, que segundo König e Klocke (2002) é decorrente da solidificação do material fundido durante as descargas. A estrutura desta camada termicamente afetada é bastante diferente do material de origem (Bhattacharyya *et al.*, 2007; Lee e Tai, 2003). Segundo Casas *et al.* (2006) a presença desta camada ocasiona a redução da tenacidade à fratura e da resistência à fadiga.

O material é removido da peça por meio de fusão e vaporização de camadas superficiais. O intenso calor gerado como resultado de cada descarga causa elevados gradientes localizados de temperatura que, com o rápido resfriamento, proporcionam elevação da dureza (Lai *et al.*, 2010). Este evento de acréscimo da dureza foi registrado pela análise de microdureza, com valores mais acentuados para os parâmetros 2 e 3. Não foi possível observar variação da dureza no primeiro parâmetro, pois a distância da primeira endentação do ensaio de microdureza é superior à espessura da máxima camada afetada.

4. Conclusão

As análises realizadas demonstraram a influência dos processos de usinagem empregados sobre a qualidade superficial, e dos efeitos térmicos e mecânicos sobre a subsuperfície, além da importância de se realizar a adequação dos parâmetros de corte, a fim de garantir a qualidade das peças fabricadas.

Os valores de rugosidade obtidos pelos processos de furação e fresamento apresentaram diferenças entre ambos, tendo sido registrados valores ligeiramente superiores para o processo de furação. Não houve alterações quanto aos diferentes parâmetros de corte empregados nestes processos. Já os resultados apresentados por eletroerosão apresentaram acréscimos significativos nos valores de rugosidade com o aumento da severidade dos parâmetros de usinagem.

A avaliação da integridade subsuperficial não demonstrou alterações significativas para os processos de furação e fresamento. Foram observadas deformações plásticas, as quais não ultrapassaram a faixa dos 25 µm, e aumento de microdureza, o que caracteriza um possível encruamento da camada superficial, sendo

que o avanço foi o parâmetro de corte que demonstrou maior influência sobre este fenômeno. Já as subsuperfícies usinadas por eletroerosão apresentaram valores de camada afetada significativamente maiores com o aumento da severidade dos parâmetros.

Referências

- BASAVARAJAPPA, S.; CHANDRAMOHAN, G.; PRABU, M.; MUKUND, K.; ASHWIN, M. 2007. Drilling of hybrid metal matrix composites - Workpiece surface integrity. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **47**:92-96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.02.008>
- BHATTACHARYYA, B.; GANGOPADHYAY, S.; SARKAR, B.R. 2007. Modelling and analysis of EDM_{ED} job surface integrity. *Journal of Materials Processing Technology*, **189**:169-177. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.01.018>
- CASAS, B.; TORRES, Y.; LLANES, L. 2006. Fracture and fatigue behavior of electrical-discharge machined cemented carbides. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, **24**:162-167. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2005.04.007>
- DABADE, U.A.; JOSHI, S.S.; BALASUBRAMANIAM, R.; BHANUPRASAD, V.V. 2007. Surface finish and integrity of machined surfaces on Al/SiCp composites. *Journal of Materials Processing Technology*, **192-193**:166-174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.044>
- FARIAS, A. 2009. *Análise da tensão residual e integridade superficial no processo de torneamento em materiais endurecidos no aço ABNT 8620 cementado*. São Paulo, SP. Dissertação de Mestrado. USP, 191 p.
- HIOKI, D. 2006. *Influência dos parâmetros de corte do fresamento HSM sobre o desempenho tribológico do aço AISI H13 endurecido*. São Paulo, SP. Tese de Doutorado. USP, 233 p.
- JAVIDI, A.; RIEGER, U.; EICHLSEDER, W. 2008. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. *International Journal of Fatigue*, **30**:2050-2055. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.01.005>
- KÖNIG, W.; KLOCKE, F. 2002. *Fertigungsverfahren: Drehen, Bohren, Fräsen*. 7. Auflage. Berlin, Springer-Verlag, 547 p.
- LAI, L.C.; CHIOU, W.A.; EARTHMAN, J.C. 2010. Influence of electrical discharged machining and surface defects on the fatigue strength of electrodeposited nanocrystalline Ni. *International Journal of Fatigue*, **32**:584-591. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2009.04.010>
- LEE, H.T.; HSU, F.C.; TAI, T.Y. 2004. Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper-tungsten electrode. *Materials Science and Engineering*, **364**:346-356. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2003.08.046>
- LEE, H.T.; TAI, T.Y. 2003. Relationship between EDM parameters and surface crack formation. *Journal of Materials Processing Technology*, **142**:676-683. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00688-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00688-5)
- OLIVEIRA, J.M. 2006. *Caracterização da integridade de superfícies usinadas para produção de moldes e matrizes*. Caxias do Sul, RS. Dissertação de Mestrado. UCS, 110 p.

ROSARIO, J.F.A. 2006. *Avaliação da integridade da superfície no torneamento de um ferro fundido nodular com carboneto*. São Paulo, SP. Dissertação de Mestrado. USP, 138 p.

SANTOS, A.L. 2001. *Metodologia via redes neurais para a estimativa da rugosidade e do desgaste de ferramentas de corte no processo de fresamento frontal*. Uberlândia, MG. Tese de Doutorado. UFU, 194 p.

WHITEHOUSE, D.J. 2000. *Surfaces and their measurement*. London, Hermes Penton Science, 395 p.

Submissão: 07/11/2010

Aceite: 10/11/2010