

VELOCIDADE DE CORTE UM PARAMETRO IMPORTANTE NO TORNEAMENTO DO FERRO FUNDIDO NODULAR COM FERRAMENTA CERÂMICA DE ALUMINA

C., Santos¹; L. F. Sousa¹, O. M. M. SILVA³; J.V.C. Souza^{1,2}; R. F. ÁVILA⁴, J. P.B.Machado⁵

¹UNIFOA – Av. Lucas Evangelistas, 862, Volta Redonda, CEP. 27215-530, Brasil

²FATEC.- Rod. Vereador A. F. Dias, 4010, Pindamonhangaba, CEP: 12445-010, Brasil, e-mail: Jose.vitor01@fatec.sp.gov.br.

³DCTA-IAE/AMR – Pça. Marechal do A. E. Gomes, 50, SJC – SP, CEP. 12228-904, Brasil

⁴IFET-SUDESTE MG- R. Bernardo M., 1283, Juiz de Fora-MG, CEP. 36080-001, Brasil

⁵INPE – Instituto Nac. de Pesq. Espaciais, Av. dos Astronautas,1.758, SJC – SP, 12227-010

RESUMO

Na atualidade o uso de ferramentas cerâmicas nos processos de usinagem vem promovendo importantes resultados, devido a sua alta resistência à abrasão, elevada dureza em altas temperaturas, inércia química, e outras propriedades. Esse trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de uma ferramenta a base de alumina desenvolvida em laboratório, caracterizada e retificada de acordo com a norma ISO 1832. Os testes de torneamento foram realizados no ferro fundido nodular com dureza de 205HB, utilizando as velocidades de corte (V_c) de 200, 300, 400 e 500 m/min., avanço (f) 0,25 e 0,10 mm/rot e profundidade de corte (a_p) de 0,50mm. As ferramentas foram caracterizadas quanto à densidade relativa, dureza e tenacidade à fratura. Os testes realizados foram caracterizados quanto ao desgaste de flanco (V_b), rugosidades superficiais (R_a e R_v) em função do comprimento de corte (L_c). Os resultados mostraram que com o aumento da V_c , os desgastes de flanco foram reduzidos.

Palavra Chave: Torneamento; Ferro fundido nodular; Usinagem a seco; Ferramentas de alumina; Desgaste de flanco.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o desenvolvimento de novas ligas de ferro fundido tem promovido diferentes aplicações desse material, aumentando a competição entre esses materiais, o tem interferido diretamente nos processos de fabricação. Essa melhoria tem permitidos o uso dos ferros fundidos em diversas aplicações assegurando aumento de vida dos equipamentos [1].

Entre os ferros fundidos, o nodular tem apresentado importante aumento de sua aplicação industrial em função de seu conjunto de propriedades; como alta resistência a tração, desgaste, fadiga, além de apresentar uma importante relação, entre dureza e tenacidade a fratura. Essas propriedades são obtidas em função dos nódulos formados em sua microestrutura, o que retém a velocidade da trinca na estrutura tornando um material abrasivo, apresentando resistência a quente e dureza em trabalhos de altas temperaturas [2].

Ao mesmo tempo em que o ferro fundido nodular apresenta importantes propriedades esses materiais apresentam baixa usinabilidade em função de suas características microestruturais e suas propriedades mecânicas e tribológicas. Entretanto na usinagem dessa liga tem sido utilizado ferramentas de metal duro revestidas, nitreto de silício, SiAlON, e CBN [2, 3, 4].

As ferramentas cerâmicas oferece alta produtividade, devido a sua excelente propriedade de resistência a dureza em alta temperatura, inércia química, resistência à abrasão, e outros, que permite o uso dessas ferramentas nos processos de usinagem a seco e em altas velocidades de corte. Esse desempenho este diretamente ligado com a combinação de propriedades física e mecânica. Porém a grande dificuldade dessas ferramentas no mercado nacional esta relacionada por ser uma tecnologia restrita a um pequeno grupo de empresas internacionais, fazendo com que no Brasil, estas sejam importadas de maneira integral, fator que eleva os custos dos processos industriais. Porém outro ponto pode ser destacado, é que estas ferramentas apresentam possíveis fragilidades, dependem de tipos específicos de maquinas ferramentas, além de possuir no mercado uma restrição popular [5]. Com os avanços alcançados no desenvolvimento destas ferramentas no Brasil, a evolução de maquinas e equipamentos de usinagem, esses restrições estão diminuindo consideravelmente, sendo observado a presença das ferramentas cerâmicas na usinagem de varias ligas, em função de ser um importante redutor de custos [6]. Nas indústrias europeias os processos de

fabricação por usinagem com ferramentas cerâmicas vêm apresentando importantes evoluções. Nestas indústrias parte dos recursos são direcionado ao desenvolvimento de novas ferramentas cerâmicas, que possam trabalhar em altas velocidade, sem a utilização de fluido refrigerante [7]. Entre os materiais cerâmicos, as ferramentas de alumina têm despertado grande interesse científico e tecnológico como material estrutural e funcional, devido as suas excelentes propriedades como: boa refratariedade, elevada resistência mecânica, alta dureza, alta condutividade iônica, baixa condutividade térmica e resistência ao choque térmico [8].

USINAGEM A SECO

O processo de usinagem sem o uso de fluido refrigerante envolve ausência de efeitos positivos nos processos de corte dos metais. O não uso desses fluidos podem promover efeitos positivos ao meio ambiente, saúde humana, além de promover redução de custos.

Na usinagem a seco um fator importante, é que a ferramenta deve possuir propriedades mecânicas superior ao material que esta sendo usinado quando da ação de temperaturas elevadas, além de promover uma remoção de calor adequada que evite a acumulação de calor por muito tempo na interface ferramenta/peça, o qual pode vir danificar a ferramenta e/ou a peça [9]. Durante a **remoção de cavacos**, o mesmo pode causar diferentes danos na superfície das ferramentas, porém materiais com alta resistência a temperatura deve ser utilizados para que o **processo possa preservar a integridade da superfície da peça e produzir desgaste na ferramenta de maneira estável**. Para alcançar tais objetivos normalmente fluidos refrigerantes são utilizados. Devido aos **danos ao meio ambiente, saúde humana, e aos aumentos de custos, o uso de fluidos refrigerantes deve ser indesejável. Dependendo do material da peça e do material da ferramenta, a redução de custos pode alcançar até 17% do custo total de uma peça se o processo for realizado a seco. Isto é principalmente devido à eliminação de refrigeração, os custos de manutenção, limpeza e eliminação [10 - 13]**.

É destacado no mercado que a **redução de custos no processo de corte, juntamente com a redução da poluição ambiental é a principal chave para a indústria, se manter competitiva e rentável no futuro**.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Desenvolvimento da Ferramenta

A ferramenta cerâmica foi produzida usando pós de alumina α (α -Al₂O₃ da Alcoa) e óxido de ítrio (Y₂O₃ da HCST da Alemanha), com uma composição de 95% em peso Al₂O₃ e 5% em peso Y₂O₃, com tamanho de partículas de 0,40 - 0,70 μ m. A composição foi moída e homogeneizada em meio líquido por 24h utilizando moinho de bolas rotativo com potes e esferas de alumina. Após a homogeneização realizou um controle de qualidade em função do peso das esferas e do copo do moinho para observar possível contaminação. Em seguida o pó foi secado em estufa a 120 °C, desagregado e peneirado em malhas de 100 *mesh* (0,15mm). Os corpos a verde foram prensados uniaxialmente em uma matriz metálica no formato 16,36 x 16,36 x 7,50 mm, com carga de 80 MPa, seguida por prensagem isostática com carga de 300 MPa, por 2 min. Os corpos a verde foram acomodados sobre um cadinho de alumina, protegido por uma cama de alumina grossa, seguido da sinterização nas temperaturas de 1600 °C por 2 h, com taxas de aquecimento de 15 °C/min até 1200 °C, 10 °C/min até 1400 °C e 5 °C/min até a temperatura final. O resfriamento se deu na inércia do forno.

Após a sinterização as cerâmicas foram analisadas quanto à densidade relativa pelo princípio de Arquimedes, e posteriormente lixadas e polidas para análise de microdureza e tenacidade à fratura utilizando método de indentação Vickers com carga de 20 N, de acordo com as normas ASTM-C-1327-99 [14] e ASTM-C-1421-99 [15], respectivamente.

Teste de Usinagem

Os testes de usinagem tiveram como objetivo avaliar o desempenho da ferramenta de alumina desenvolvida em laboratório no teste de torneamento do ferro fundido FUCO FE45012 com grafita nodular em uma matriz ferrítica/perlítica de acordo com a norma ASTM A247, Figura 1. O ferro fundido utilizado possui dureza aproximada de 203 HB e composição química 2,99-3,30% de C, 2,2-2,73% de Si, 0,40% de Mn, 0,044-0,056% de P, 0,065-1,09% de S, 0,05% de Cr, 0,08-0,10% de Cu e o restante de Fe. Os corpos de prova foram pré-usinados para uma melhor

fixação nas castanhas, sendo os testes conduzidos utilizando parte útil de 104 mm em diâmetro e 300 mm de comprimento.

O principal parâmetro a ser variado no torneamento do ferro fundido nodular foram as velocidades de corte (V_c) de 200, 300, 400 e 500 m/min., avanço (f) 0.25 e 0.10 mm/rot. mantendo a profundidade de corte fixa em (a_p) de 0.50 mm. Todas as condições foram submetidas a replicas utilizando um torno CNC marca Romi modelo Centur 30D, com RPM Máxima de 4500 RPM e potência de 7,5KW, Figura 2.

As ferramentas utilizadas nos teste foram desenvolvidas em laboratório, apresentou dureza de $12,10 \pm 0,12$ GPa, $K_{ic} = 8,6$ MPa.m^{1/2}, densidade relativa de $97,23 \pm 0,15\%$, na geometria de acordo com a norma ISO 1832, conforme Figura 3, e fixada em um suporte da marca Sandvick modelo DSBNR 2020K 12, conforme Figura 4, pertencentes ao núcleo de pesquisas NUPAM do IF Sudeste MG.

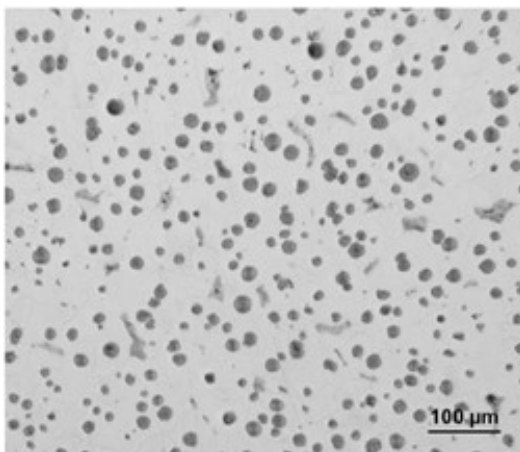


Figura 1- Microestrutura do ferro fundido nodular; Figura 2- Torno CNC marca Romi.

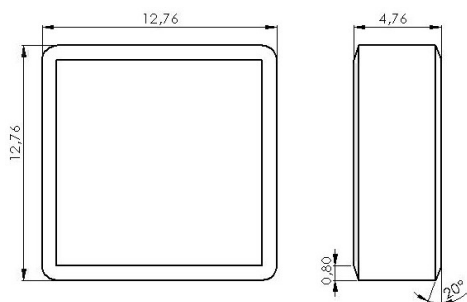


Figura 3- Geometria da ferramenta; Figura 4- Porta ferramentas modelo DSBNR 2020K 12

Análise dos Desgastes e Rugosidades

As caracterizações dos desgastes ocorridos nas ferramentas foram realizadas com o auxílio de um microscópio estereoscópico trinocular (mod. SZ-6145 TR), marca olympus com aumento da imagem em 45 vezes, e um software de captura de imagens (AnalySis). As análises foram determinadas de acordo com a norma ISO 3685/1993, a qual fixa o desgaste de flanco máximo de 0,6mm. As rugosidades (R_a e R_y) foram realizadas utilizando um rugosímetro Mitutoyo SJ-301 em três regiões distintas, defasadas de 120° uma da outra aplicando um filtro GAUSS e cut off de 0,08mm de acordo com as normas DIN 4768 e ISO 288 [16]. Os equipamentos de caracterizações dos testes de usinagem pertencem ao núcleo de pesquisas NUPAM do IF Sudeste MG.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com as literaturas, a velocidade de corte é o parâmetro que mais influência no desgaste da ferramenta devido ao aumento de energia (calor) que é imputada ao processo, sem o aumento da área da ferramenta que recebe esse calor (ponta da ferramenta). Por consequência isso afeta os desgastes de flanco, que influencia na vida da ferramenta, e promove diferentes valores de rugosidades e economia nos processos.

Desgaste da Ferramenta

A Figura 5 mostra o comportamento do desgaste da ferramenta cerâmica de alumina produzida em laboratório em função do comprimento de corte utilizando diferentes velocidades de corte. Na Tabela 1, pode ser observados com detalhes os diferentes comprimentos de corte em função das velocidades de corte utilizadas na usinagem por torneamento no ferro fundido nodular.

Condições	V_c (m/min)	f (mm/rot)	Comprimento de corte(m)
1	200	0,25	2943
2	300	0,25	1503
3a)	400	0,1	2150
3		0,25	1329
4a)	500	0,1	4333
4		0,25	3493

Progresso do Desgaste de Flanco

A Figura 5 mostra a influência das velocidades de corte no desgaste da ferramenta de alumina.

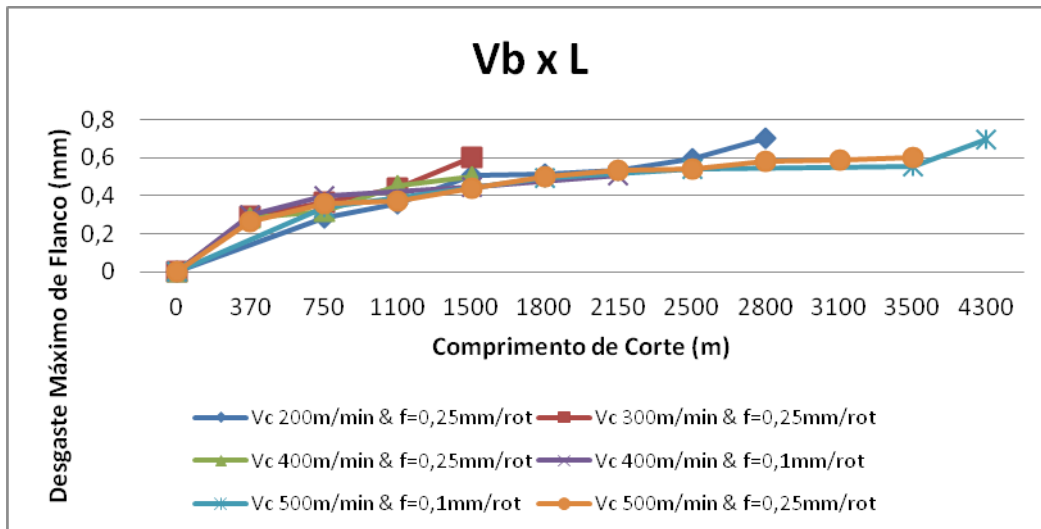


Figura 5- Variações dos desgastes de flanco x comprimento de corte

Na Figura 5 podemos observar que a ferramenta apresentou significativa redução do desgaste de flanco em função do aumento da velocidade de corte. Analisando os desgastes em função do comprimento de corte podemos observar que houve uma linearidade dos desgastes, que evidencia que a ferramenta não sofreu falhas catastróficas (abrupta) durante os testes nas condições utilizadas, não confirmando a inerente fragilidade atribuída as ferramentas cerâmicas [5]. Analisando as velocidades de corte utilizadas nos testes podemos concluir que o melhor desempenho ocorreu na $V_c = 500$ m/min. Nestas velocidades pode ser observado que o comprimento de corte foi de 4333m e desgaste de flanco de 0,7mm utilizando avanço de 0,1 mm/rot. e de 3493m para um desgaste de flanco de 0,6mm com o uso do avanço de 0,25 mm/rot. Nas condições de menores velocidades de corte houve também uma significativa redução do comprimento de corte. Faz-se exceção para velocidade de corte de 200m/min que promoveu um comprimento de corte 2943m superior as condições dos testes com as $V_c = 300$ m/min e 400m/min.

As obtenções destes resultados podem ser atribuídas à característica específica das ferramentas cerâmicas, que possui melhor desempenho em altas velocidades de corte, devido ao calor gerado na interface ferramenta peça, o qual diminui a resistência do material que está sendo usinado. Porém quando do desempenho da ferramenta na condição de 200m/min e comparada às condições de 300m/min e 400m/min. podemos concluir que houve menor pressão de corte na interface da ferramenta.

Análises dos Desgastes nas Ferramentas

Analisando as micrografias das ferramentas representadas pelas Figuras 6 a 11, podemos observar que para todas as condições de corte utilizadas, o mecanismo de desgaste predominante foi abrasão, o qual promoveu desgastes de forma linear na superfície de flanco da ferramenta. Pode ser observado nas micrografias, que nas velocidades de corte de 200, 300 e 400 m/min., os desgastes foram mais atuante. Para de $V_c = 500$ m/min. a ferramenta apresentou melhor desempenho alcançando maior comprimento de corte. As menores ações de desgaste na ferramenta em altas velocidades de corte estão relacionadas com o aumento da temperatura de usinagem, a qual tende a diminuir a resistência do material, e promove energia auxiliar para quebra de moléculas da fase grafita promovendo a dissolução, que posteriormente se transforma em fluido pastoso, e dessa maneira protege a aresta de corte com diminuição do atrito entre a ferramenta e a peça.

Portanto a evidência dessa ação na interface ferramenta/peça pode ser confirmada nas medidas de rugosidades superficial, a qual irá tender a diminuir em função da ação do fluido pastoso e também da redução do avanço.

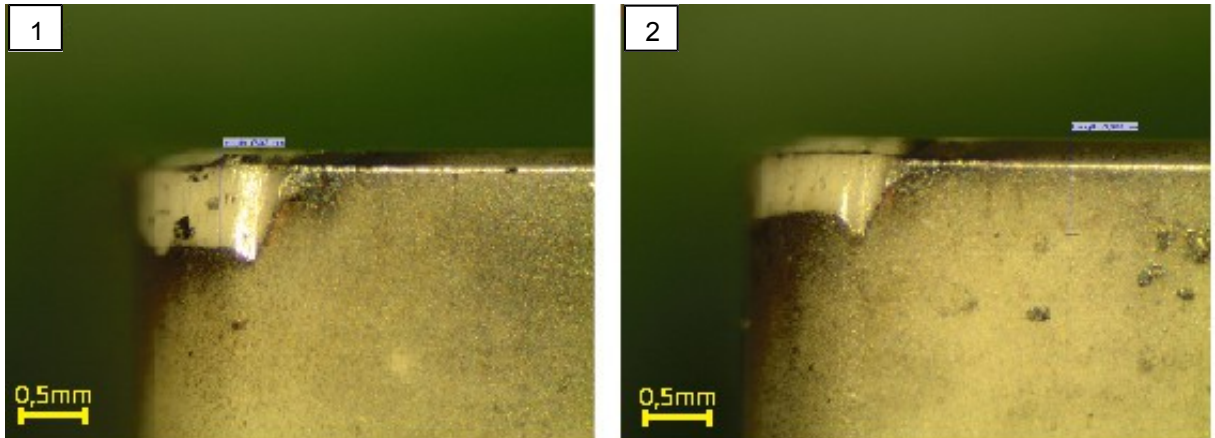


Figura 6- Desgaste de flanco da $V_c = 200$ m/min, $f = 0,25$ mm/rot; Figura 7- Desgaste de flanco da $V_c = 300$ m/min, $f = 0,25$ mm/rot.

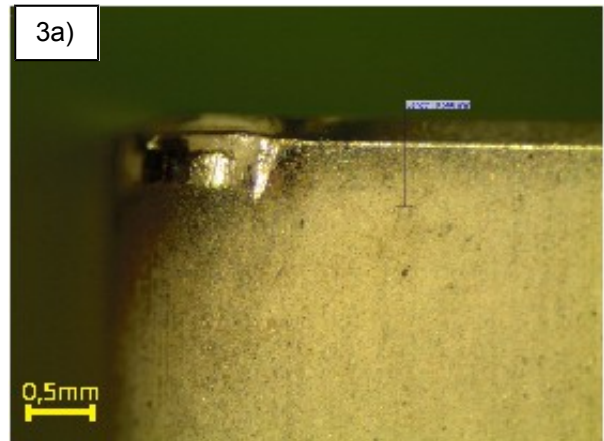
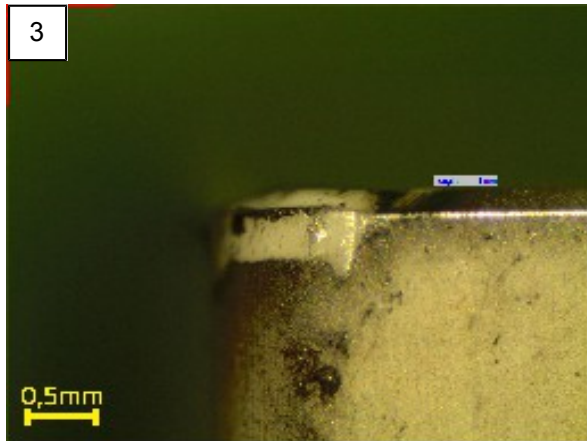


Figura 8- Desgaste de flanco da $V_c=400\text{m/min}$, $f=0,25\text{ mm/rot}$; Figura 9- Desgaste de flanco da $V_c=400\text{m/min}$, $f=0,10\text{ mm/rot}$.

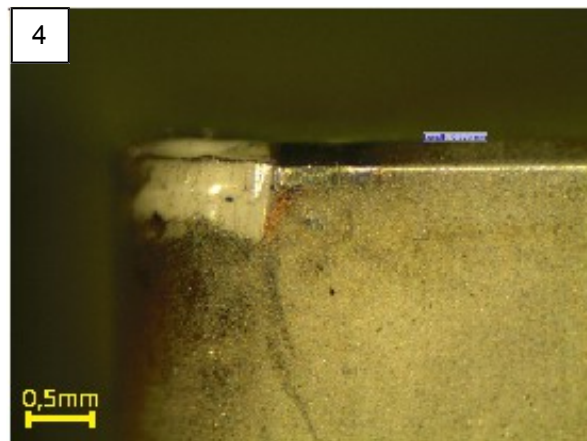


Figura 10- Desgaste de flanco da $V_c=500\text{m/min}$, $f=0,25\text{ mm/rot}$; Figura 11- Desgaste de flanco da $V_c=500\text{m/min}$, $f=0,10\text{ mm/rot}$;

Análises das Rugosidades Superficiais (R_a , R_y)

Nas Figuras 12 e 13 podem ser observadas as variações das rugosidades em função do comprimento de corte para as diferentes velocidades de corte utilizadas.

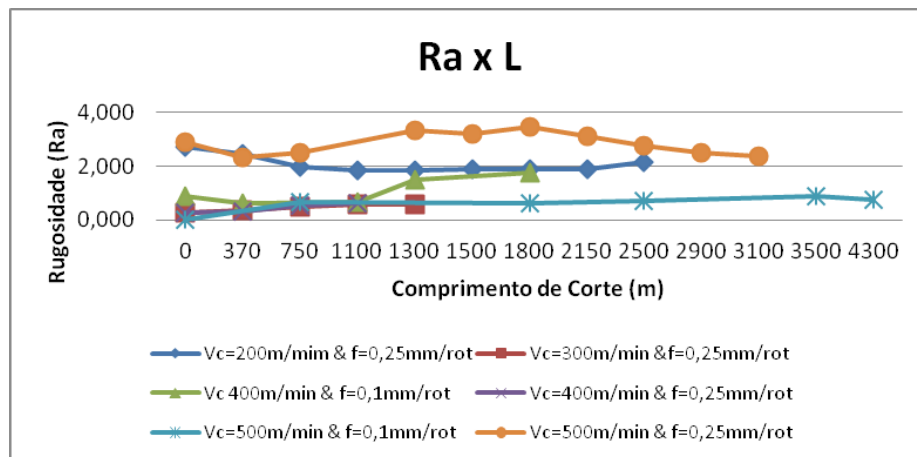


Figura 12- Rugosidade R_a x comprimento de corte.

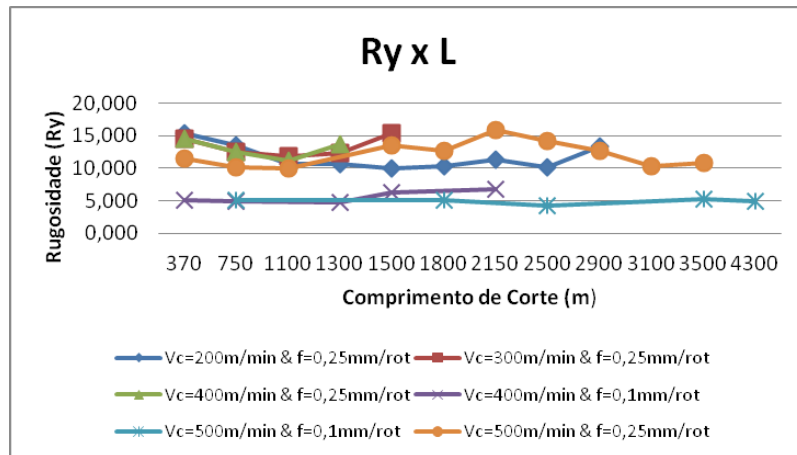


Figura 13- Rugosidade R_y x comprimento de corte.

Nas Figuras 12 e 13, podemos observar que os valores de rugosidades (R_a , R_y) variam em função das velocidades de corte utilizadas. Portanto, os resultados demonstraram tendências de uma melhor acomodação para a velocidade de corte 500m/min e avanço de 0,1 mm/rot. Nas demais condições os valores de rugosidades foram superiores. Assim de maneira geral podemos observar que houve uma importante acomodação entre a ferramenta e a peça para todas as condições. As Figuras 12 e 13, mostram que inicialmente as rugosidades aumentam, e que posteriormente tende a reduzir em função do comprimento de corte. Portanto para as velocidades de corte de 500m/min com avanço de 0,1 mm/rot, e 300m/min com avanço de 0,25 mm/rot a rugosidades R_a mantém-se linear, enquanto que nas demais condições o perfil da rugosidade são variados. Esses perfis de rugosidades observados nos gráficos evidencia uma perfeita acomodação da ferramenta/peça, sendo melhor observado na rugosidade R_a quando do uso da velocidade de corte de 500m/min, avanço de 0,1mm/rot, o qual mostra que ao longo do comprimento de corte o R_a variou entre 0,62 e 0,87 μm . Na análise do gráfico R_y esse fato confirma que a velocidade de corte de 500m/min, avanço de 0,1mm/rot., apresenta menor rugosidades tanto para R_a como para R_y . Quando da obtenção da menor rugosidade podemos observar que ocorreu em função do menor avanço, mas outro fator que possivelmente influenciou na rugosidade foi a dissolução e distribuição do grafite sobre a superfície da peça. Assim tanto o menor avanço, quanto a dissolução de grafite sobre a superfície da peça promoveu um melhor homogeneidade da topográfica da peça usinada.

CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que o uso de maiores velocidades de corte promoveram um melhor desempenho da ferramenta de alumina. Nas condições de 500m/min, avanço de 0,1mm/rot., as ferramentas mostraram menor desgastes de flanco, e comprimento de corte de 4333m, com menores valores de rugosidade (R_a), com variações entre 0,62 e 0,87 μm . Também para rugosidade (R_y), obteve a menor rugosidade.

Esse desempenho obtido com uso de maiores velocidades de corte ,e em função da maior concentração de temperaturas na interface ferramenta/peça. Nessa condição a ferramenta cerâmica tende a suportar maior calor, e isso diminui a resistência do material, que esta sendo usinado. Especialmente no ferro fundido nodular durante a usinagem o grafite contido na microestrutura é transformado em fluido pastoso, o que auxilia no desempenho da ferramenta reduzindo o atrito entre a ferramenta e a peça.

REFERENCIAS

- [1] H.Schulz, U.Reuter, 'Verschleißmechanismusgeklärt: GGV-Motorenreiffuhr die Großserie', *WerkstattundBetrieb* 134(7–8)(2001)80–82.
- [2] Klocke F, Klopper C, Lung D, Essig C (2007) Fundamental Wear Mechanisms when Machining Austempered Ductile Iron (ADI). *Annals of the CIRP* 56(1): 73–76.
- [3] Byrne G, Dornfeld D, Denkena B (2003) Advancing Cutting Technology. *Annals of the CIRP* 52(2):483–507.
- [4] Coated SiAlON and Silicone Nitride Cutting Materials, www.ceramtec.com.
- [5] ACCHAR, W. *Materiais Cerâmicos: Ciência e Tecnologia*, EDUFRN, Rio Grande do Norte, p. 13-14, 111, 2000.
- [6] DORÉ, C. et al. Avaliação do desempenho de ferramentas de cerâmica AL₂O₃+Y₂O₃+NBC na usinagem de ferro fundido vermicular, *anais COBEF 2007*.
- [7] SOUZA ,J.V.C.; et al. Behavior of the Silicon Nitride Cutting Tool During Ti-6Al-4V Machining. In: *Fifth International Conference on High Speed Machining, 2006, Metz. Fifth International Conference on High Speed Machining, 2006*.
- [8] MONDAL B. Zirconia toughened alumina for wear resistant engineering and machinability of steel application. *Adv Appl Ceram* 2005;104(5):256–60.
- [9] LANNA, M. A., et al. Otimização de custos de produção de ferramentas utilizando interização normal. *Anais do 48o Congresso Brasileiro de Cerâmicas, 2004*
- [10] EZUGWU, E. O., Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys, in: *international Journal of Machine Tools and Manufacture* 45 (2005) 1353-1367.
- [11] LAHRES, M.; DOERFEL, O.; NEUMÜLLER, R. Applicability of different hard coatings in dry machining an austenitic steel. *Surface and Coatings Technology* 120-121 (1999), pp. 687–691.
- [12] BRINKSMEIER, E.; WALTER, A.; JANSSEN, R.; DIERSEN, P.; Aspects of cooling lubrication reduction in machining advanced materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 213 Part B (1999), pp. 769–778.
- [13] POPKE, H.; EMMER, T.; STEFFENHAGEN, J. Environmentally clean metal cutting processes—machining on the way to dry cutting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 213 Part B (1999), pp. 329–332.
- [14] ASTM: C1327-99, "Standard test method for vickers indentation hardness of advanced ceramics", pp. 1-8, 1999.
- [15] ASTM: C-1421-99, "Standard test method for determination of fracture toughness of advanced ceramics at ambient temperature", pp. 1-32, 1999.
- [16] INTERNATIONAL STANDARD ISO 3685/1993 Tool Life Testing Whit Single-Point Turning xx tools, 1993.

CUTTING SPEED AN IMPORTNATE PARANETER ON TURNING DUCTILE CAST IRON WITH ALUMINA CERAMIC CUTTING TOOL

ABSTRACT

Nowadays the use ceramic cutting tools in machining process has been promoted important results due to high abrasion resistance, hardness in high temperature, chemistry inert and others properties. The present study such as objective to evaluate the performance of the alumina (Al_2O_3) based ceramic tools development in laboratory, characterize and polishing agreement ISO 1832. The machining tests were performed on specimens of pearlitic-ferritic nodular (spheroidal) with hardness of 205HB under varying cutting speeds of (V_c) 200, 300, 400 and 500 m/min., feed rate (f) 0.25 and 0.10 mm/rev and constant depth of cut of (a_p) 0.50 mm. The cutting tool presented 97.23 % of theoretical density, mechanical properties like hardness and fracture toughness of 12.10 GPa and 8.6 MPa.m^{1/2}, respectively. The results of dry machining were observed by light optical microscopy (LOM) in function of flank wear (V_b), cutting length (L_c) and surface finish (R_a and R_y). The results showed that the high cutting speeds promote decrease flank wear.

Keywords: Turning; Ductile cast iron; Dry machining; Al_2O_3 ; Flank wear.