

## Análise da viabilidade do uso da ferramenta a base de $Al_2O_3$ -YAG no torneamento do ferro fundido nodular

### *Analysis of use of tool based on $Al_2O_3$ -YAG in the turning of iron ductile*

Leopoldo Ferreira de Sousa<sup>1,5</sup>

José Vitor Candido de Souza<sup>2</sup>

Olivério Moreira de Macedo Silva<sup>3</sup>

Anna Renata Marcondes<sup>4</sup>

Claudinei dos Santos<sup>1</sup>

Renato Françoso de Ávila<sup>5</sup>

Artigo  
Original

Original  
Paper

#### Palavras-Chave

Ferramentas cerâmicas

Compósito  $Al_2O_3$ -  
 $Y_3Al_5O_{12}$

Usinagem a seco

Torneamento

Ferro fundido nodular

#### Resumo

O processo de usinagem com ferramentas cerâmicas esta em franca expansão no Brasil devido as suas características intrínsecas das cerâmicas, como: alto ponto de fusão, alta dureza, boa inércia química, resistência à corrosão alta resistência ao desgaste, propriedades que fazem essas ferramentas serem candidatas a uso em altas temperaturas. Essas propriedades têm possibilitado a aplicação em processo de usinagem a seco, promovendo inúmeros benefícios, tais como: não poluição atmosfera, redução de danos à saúde do operador, eliminação de limpeza e reduções de custos. Devido à fragilidade inerente das ferramentas, esta operação pode se tornar muito complexa ou mesmo inviável se não forem utilizados os parâmetros de corte corretos para cada tipo ferramenta. Este trabalho tem como objetivo determinar as melhores condições de uso para a ferramenta cerâmica a base de alumina-YAG desenvolvida em laboratório, quando da sua aplicação no torneamento do ferro fundido nodular em condições a seco. As ferramentas foram sinterizadas na temperatura de 1600°C, e posteriormente retificadas de acordo com norma ISO 1832. As caracterizações das ferramentas mostraram, dureza Vickers de 12,1GPa, tenacidade à fratura de 8,6MPa.m<sup>1/2</sup> e densidade relativa de 97,23%. Os testes de usinagem a seco foram realizados utilizando replicas nas velocidades de corte ( $V_c$ ) de 500 e 600 m/min, profundidade de corte ( $a_p$ ) de 0,5 mm e avanço ( $f$ ) de 0,1 e 0,25mm/rot. Posteriormente foram utilizadas as mesmas velocidades, mas com  $a_p=0,25$  mm e  $f=0,08$  e 0,04 mm/rot. O desempenho da ferramenta foi observado em função dos desgastes de flanco ( $V_b$ ), rugosidade superficial ( $R_a$  e  $R_z$ ) e comprimento de corte ( $L_c$ ). Os resultados obtidos mostraram que as ferramentas possuem potencial para usinagem a seco de ligas automotivas, além de mostrar um importante delineamento para redução de custos nos processos usinagem.

<sup>1</sup> UniFOA – Centro Universitário de Volta Redonda

<sup>2</sup> Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - Unesp - Universidade Estadual Paulista

<sup>3</sup> DCTA- IAE/AMR - Pça. Marechal do Ar E. Gomes, 50, São José dos Campos - SP, CEP. 12228-904, Brasil

<sup>4</sup> FATEC- R. Tomé Portes Del Rey, 526, Taubaté – SP, CEP. 12070-610, Brasil.

<sup>5</sup> IFET Sudeste- R. Bernardo Mascarenhas, 1283, Juiz de Fora - MG, CEP.36080-001, Brasil

**Abstract**

The machining process with ceramics cutting tools is in full expansion at Brazil, due to your intrinsic characteristics as such: high melting point, high hardness, good chemical inertness, corrosion resistance and high wear resistance; that make them promising candidates for high temperature. These factors have made possible the application of dry machining, offering important benefits because non-pollution of atmosphere or of water; reduces the danger to health, eliminates cleaning and reduction of costs. Due to the inherent fragility of the ceramics cutting tools, its utilization is very complicated or even impossible if there is not performed an analysis of the best parameters for each cutting tools type. The objective this work is to determine the best condition for alumina and yttria (YAG) based cutting tool developed in laboratory to use as cutting material on dry turning of nodular cast iron. The cutting tools was sintering in the temperature of 1600°C the subsequent were cut and ground of accordance with ISO 1832. The results of properties of the new cutting tool showed hardness Vickers of 12.1GPa, fracture toughness ( $K_{Ic}$ ) of 8.6 MPa.m<sup>1/2</sup> and relative density of 97.23%. All dry turning tests was conducted using a twice replicated to cutting speed (Vc) of 500 and 600 m / min, feed rate (f) of 0.10 and 0.25mm/rev  $a_p = 0.5$  mm. Later the same cutting speed with feed rate (f) of 0.08 and 0.04 mm/rev and depth of cut ( $a_p$ ) of 0.25 mm was been used. Tool performance was evaluated with respect to tool wear, cutting length (Lc) and surface roughness ( $R_a$  and  $R_z$ ). This paper showed that dry turning processes are promising to apply in machining alloys to automotive industries showing that this cutting tool can be an important way for cost reduction in machining processes.

**Keywords**

Ceramic cutting tools

Dry machining

Turning

Nodular cast iron and Viability

 $Al_2O_3$ - $Y_3Al_5O_{12}$ **1. Introdução**

O desenvolvimento de novos materiais tem sido motivado pela demanda de produtos que executem novas funções de maneira segura e apresentem uma importante redução de custo nos processos. Entre esses materiais as cerâmicas vêm ocupando lugar de destaque sendo utilizadas nos mais diversos segmentos industriais.

As ferramentas cerâmicas oferecem alta produtividade, devido a sua excelente propriedade de 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. Essas condições estão relacionadas com sua importante combinação de propriedades física e mecânica. Porém a grande dificuldade dessas ferramentas no mercado estão relacionada com a sua possível fragilidade, tipos de máquinas ferramentas, restrição popular, e outras [1].

Com a atual evolução de máquinas e equipamentos de usinagem, esses fatos estão diminuindo consideravelmente, e atualmente podem ser observados a presença das ferramentas cerâmicas na usinagem de várias ligas, nas mais diversas empresas, com o objeto redutor

de processos posteriores, e consequentemente auxiliando na proteção do meio ambiente e na redução de custos dos processos [2]. Nas indústrias europeias os processos de fabricação por usinagem vêm apresentando importantes evoluções, sendo direcionada parte de seus recursos ao desenvolvimento de novas ferramentas cerâmicas, que possam trabalhar em altas velocidades, sem a utilização de fluido refrigerante [3]. 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, resistência mecânica elevada, dureza elevada, alta condutividade iônica, baixa condutividade térmica e resistência ao choque térmico [4].

De maneira geral podemos observar na literatura que existe pouca informação acerca do desenvolvimento, caracterização e utilização de ferramentas cerâmicas a base de alumina na usinagem do ferro fundido nodular. Esse trabalho se desenvolve como uma fonte importante de informações no cenário brasileiro de usinagem com ferramentas cerâmicas de alumina, com objetivo de promover uma evolução do conhecimento científico e tecnológico da usina-

gem do ferro fundido nodular com ferramenta nacional, concentrando-se na utilização por torneamento com diferentes parâmetros de corte.

## 2. Materiais cerâmicos

Os materiais cerâmicos são definidos como materiais essencialmente sólidos e compostos em grande parte por materiais inorgânicos. Esses materiais têm despertado um novo interesse em função de recentes avanços na ciência dos materiais, com o desenvolvimento de novos materiais cerâmicos com propriedades únicas [5]. As cerâmicas avançadas possuem propriedades específicas que as levam a uma série de aplicações tecnológicas, incluindo ferramentas de corte, materiais para barreira térmica, blindagem balística, e outras [6].

## 3. 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 pode promover efeitos positivos ao meio ambiente, saúde humana, e promover redução de custos.

Na usinagem a seco um fator importante, é que a ferramenta deve possuir propriedades em altas temperaturas superior à do material que esta sendo usinado, além de haver 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 [7]. A remoção de cavacos pode causar danos na superfície das ferramentas, porém materiais com alta resistência à temperatura devem ser utilizados para que o processo possa preservar a integridade da superfície da peça e produzir desgaste na ferramenta de maneira estável. O uso de fluidos refrigerantes deve ser indesejável em função de seus danos para o meio ambiente e a saúde humana. 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, aos custos de manutenção, limpeza e eliminação [8 - 11].

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.

## 4. Procedimento experimental

### 4.1. Desenvolvimento da ferramenta

A ferramenta cerâmica foi produzida usando pós de alumina  $\alpha$  ( $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  da Alcoa) e óxido de itrio ( $\text{Y}_2\text{O}_3$  da HCST da Alemanha), com uma composição de 95% em peso  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 5% em peso  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , com tamanho de partículas de 0,40 – 0,70  $\mu\text{m}$ . 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 80MPa, seguida prensagem isostática com carga de 300MPa, por 2 min. Os corpos a verde foram acomodados sobre um cadinho de alumina, protegido por uma cama de alumina, 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 a 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 em função das normas ASTM-C-1327-99 [12] e ASTM-C-1421-99 [13].

### 4.2. Testes de Usinagem

Os testes de usinagem deste trabalho têm como objetivo determinar a melhor forma de utilização da ferramenta de alumina desenvolvida em laboratório nos testes de torneamento de desbaste e acabamento superficial para o ferro fundido FUCO FE45012 com grafita nodular em uma matriz ferrítica/perlítica con-

forme mostrado na Figura 1, de acordo com a norma ASTM A247.

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 a parte útil de 104 mm em diâmetro e 300 mm de comprimento.

Na usinagem com ferramentas cerâmicas é imprescindível a tomada de certos cuidados, tais como a utilização de suportes adequados para tais ferramentas, limpeza do assento da pastilha sempre que for feita a substituição de uma de suas arestas, apoiá-la bem sobre seu encosto, não utilizar aperto excessivo ao fixar a pastilha e a utilização de um balanço mínimo para garantir uma maior rigidez de sistema e reduzir a probabilidade de vibração da ferramenta, o que poderia levar ao colapso da mesma.

Os parâmetros utilizados no torneamento do ferro fundido nodular foram determinados através de pesquisas na literatura existente e em testes iniciais sendo, encontrados os melhores parâmetros para desbaste as velocidades de corte ( $V_c = 500$  e  $600$  m/min.), avanço ( $f = 0,25$  e  $0,1$  mm/rot.) e profundidade de corte ( $a_p = 0,5$  mm), e para os testes de acabamento foram as velocidades de corte ( $V_c = 500$  e  $600$  m/min.), avanço ( $f = 0,08$  e  $0,04$  mm/rot.) e profundidade de corte ( $a_p = 0,25$  mm). Todas as condições foram submetidas a três réplicas utilizando um torno CNC marca Romi modelo Centur 30D, com RPM Máxima de 4500 RPM e potência de 7,5KW e suporte da marca Sandvick modelo DSBNR 2020K 12, apropriado para incertos cerâmicos com código ISO SNUN 120408 pertencentes ao núcleo de pesquisas NUPAM do IF Sudeste MG.

As ferramentas utilizadas nos testes a base da cerâmica YAG foram desenvolvidas em laboratório, apresentando dureza de  $12,10 \pm 0,12$  GPa,  $K_{ic} = 8,6$  MPa.m<sup>1/2</sup>, densidade relativa de  $97,23 \pm 0,12\%$ , na geometria de acordo com a norma ISO 1832, conforme Figura 2.

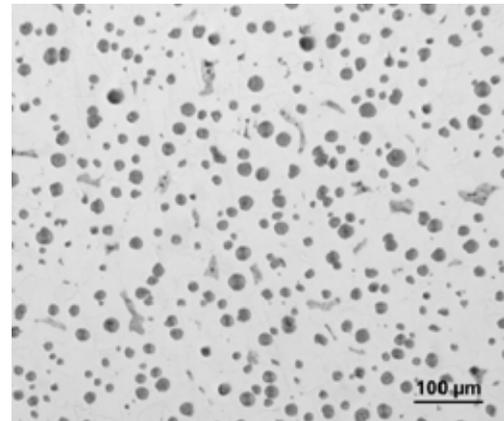


Figura 1- Microestrutura do ferro fundido

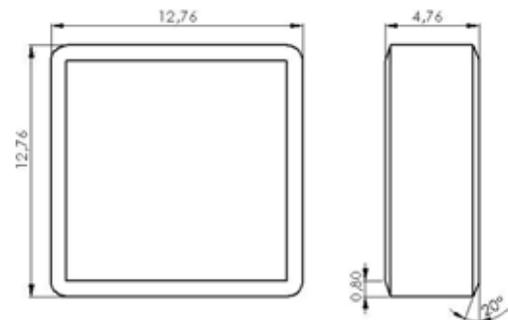


Figura 2- Geometria da ferramenta da cerâmica.

### 4.3. Caracterização dos desgastes das ferramentas

As caracterizações dos desgastes ocorridos nas ferramentas foram realizadas com o auxílio de um microscópio estereoscópico trinocular (mod. SZ-6145 TR) com aumento de 45vezes. As análises foram determinadas de acordo com a norma ISO 3685/1993, a qual fixa o desgaste de flanco máximo de 0,6mm, enquanto que a rugosidade foi realizada utilizando um rugosímetro Mitutoyo SJ-301 em três regiões distintas defasadas de 120° aplicando um filtro GAUSS e cut off de 0,08mm de acordo com as normas DIN 4768 e ISO 4288, pertencente ao núcleo de pesquisas NUPAM do IF Sudeste MG.

## 5. Resultados e discussões

### 5.1. Desgaste da ferramenta

As figuras 3, 4 e 5 mostram a influência da velocidade de corte no desgaste das ferra-

mentas de alumina. Os desgastes afetam a vida da ferramenta, a rugosidade e, conseqüentemente, a economia do processo. Nessas figuras podemos observar que a ferramenta apresentou maior comprimento de corte em função do desgaste máximo de flanco na velocidade de corte de 500m/min, principalmente quando utilizada no avanço de 0,1mm/rot. Fato este já conhecido na literatura onde o primeiro fator

que influencia no desgaste das ferramentas é o aumento da velocidade de corte seguido pelo aumento do avanço [14 - 15].

As Figuras 4 e 5, mostram que os desgastes ocorridos foram por abrasão e ocorreram de maneira progressiva. Entretanto os desgastes ocorridos apresentam reflexos diretos na rugosidade superficial da peça em função da acomodação ferramenta-peça.

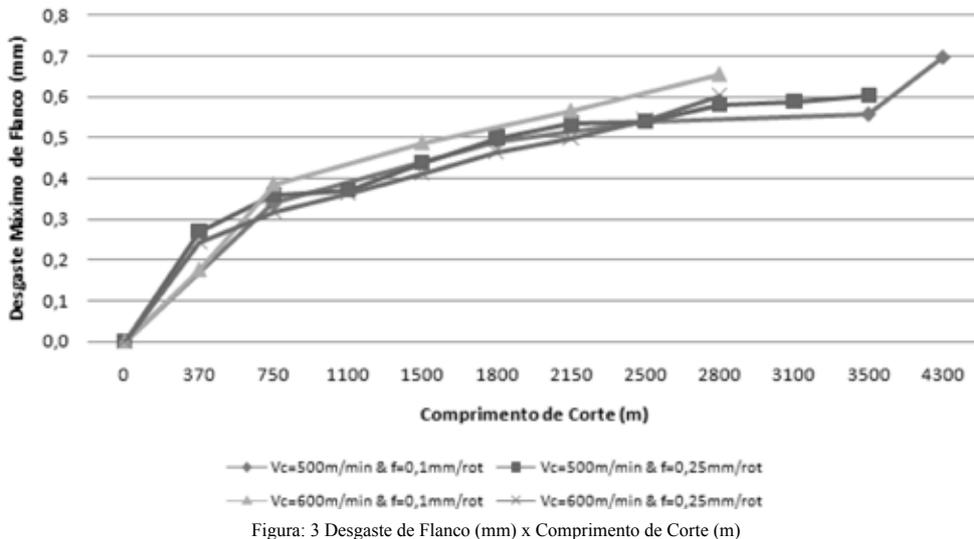
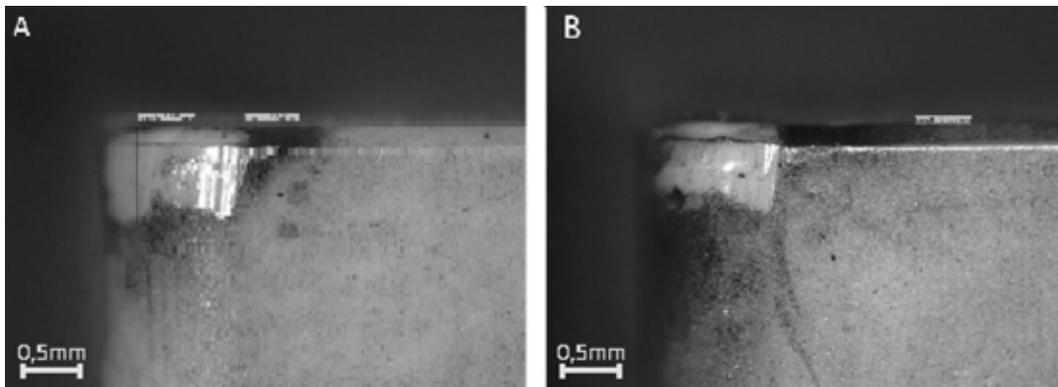
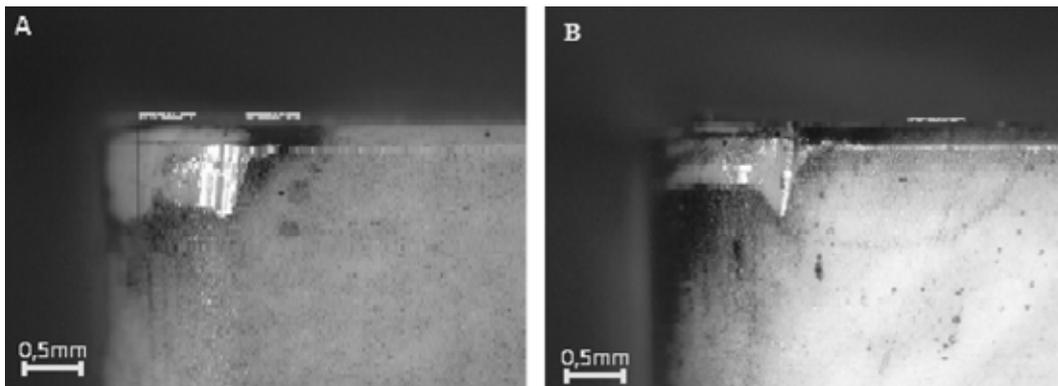


Figura: 3 Desgaste de Flanco (mm) x Comprimento de Corte (m)



Figuras 4 Desgaste de flanco: a)  $V_c=500\text{m/min}$  e  $f=0,1\text{mm/rot}$ ; b)  $V_c=500\text{m/min}$  e  $f=0,25\text{mm/rot}$



Figuras 5 Desgaste de flanco: a)  $V_c=600\text{m/min}$  e  $f=0,1\text{mm/rot}$ ; e b)  $V_c=600\text{m/min}$  e  $f=0,25\text{mm/rot}$

## 5.2. Rugosidades $R_a$ e $R_z$ nos testes de desbaste

As rugosidades são parâmetros importantes na usinagem de materiais, pois estão diretamente relacionadas com o desempenho da ferramenta e acabamento superficial e nas propriedades do material usinado. No processo de torneamento de vários materiais, a baixa rugosidade permite importante estimativa de custo no processo e maior credibilidade. Conseqüentemente, a rugosidade pode determinar a vida ferramenta e a estabilidade do sistema.

As figuras 6 e 7 mostram os perfis de rugosidade para as condições utilizadas. Observa-se que tanto para  $R_a$  quanto para  $R_z$  a rugosidade diminui com o comprimento de corte. Entretanto esses resultados são característicos das propriedades tribológicas dos pares oponentes.

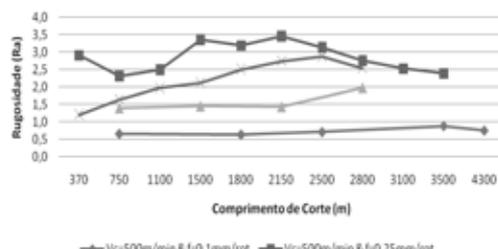


Fig. 6- Rugosidade  $R_a$  (µm) x Comp. de corte (m)

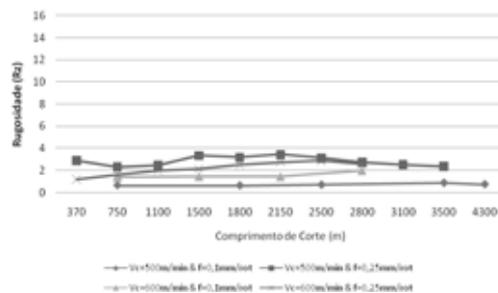


Fig. 7- Rugosidade  $R_z$  (µm) x Comp. de corte (m).

Analisando as Figura 6 e 7, pode-se observar que a menor rugosidade ocorreu quando do uso da velocidade de 500m/min com avanço de 0,1 mm/rot. Entretanto, quando do aumento da velocidade de corte e do avanço pode ser observado maior rugosidade  $R_a$  e  $R_z$  em função do comprimento de corte. Isso pode ser atribuído ao fato de quanto maior o avanço e velocidade de corte, tende-se a uma maior vibração da ferramenta e conseqüente piores resultados de rugosidade superficial.

## 5.3. Rugosidades $R_a$ e $R_z$ nos testes de acabamento

É de suma importância se conseguir bons resultados de acabamento superficial, pois esta normalmente é a última etapa do processo de fabricação das peças, onde falhas nesta etapa podem além de inutilizar a peça, acarretar em perdas de horas de trabalho das operações anteriores. Portanto, cada vez mais as empresas buscam conseguir melhores resultados de acabamento superficial já nos processos de torneamento para evitar que seja utilizado um processo específico de acabamento como no caso das retificadoras. As figuras 7 e 8 abaixo mostram os resultados das rugosidades superficiais nos testes de acabamento das peças.

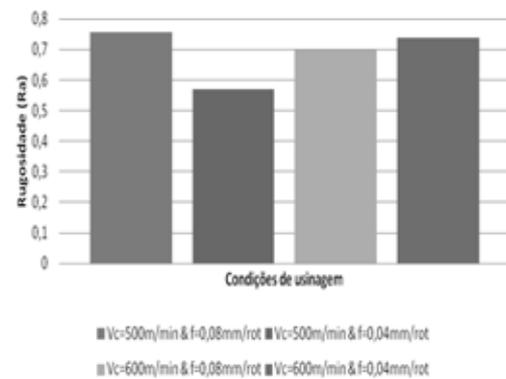


Figura 7- Rugosidade  $R_a$  (µm)

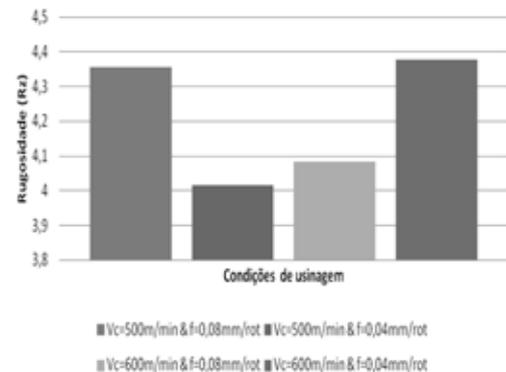


Figura 8- Rugosidade  $R_z$  (µm)

A ferramenta apresenta bons resultados de acabamento, com baixas rugosidades superficiais principalmente quando utilizada no avanço de 0,04mm/rot. Principalmente pelo  $R_a$  baixo obtido nos testes é evidente que o acabamento da peça fica em uma condição de polimento ou de super polimento dependendo dos parâmetros utilizados, e de acordo com a esta faixa de rugosidade só pode ser alcançada se fosse utilizando alguns cuidados ou métodos especiais durante o processo do torneamento.

Estes valores de  $R_a$  encontrados seriam ideais para aplicações mecânicas do tipo válvula de esfera, tambores de freio, superfície de guia de elementos de precisão, pistas de assento de agulhas de cruzetas de cardãs.

O parâmetro  $R_z$  alcançou valores mais altos de rugosidade devido a sua maior sensibilidade que o parâmetro  $R_a$ , pois somente as alturas máximas dos perfis são consideradas e não suas médias são comparadas e analisadas.

## 6. Conclusões

Os resultados obtidos nesse trabalho podem ser considerados como um aporte de um manual de referência para o torneamento do ferro fundido nodular com ferramentas cerâmicas a base da cerâmica YAG desenvolvida em laboratório. Esse trabalho apresentou uma metodologia coesa de usinagem com este tipo

de ferramenta, mostrando que os resultados de comprimento de corte para a velocidade de corte de 500 m/min, com avanço de 0,1mm/rot. são muito promissores. Os resultados de acabamento superficial mostraram que a ferramenta atingiu em alguns casos uma condição de polimento, e em outros de super-polimento, que só seria possível com a utilização de métodos ou cuidados especiais durante o torneamento. Este trabalho mostra que é possível a usinagem em diversos materiais com ferramentas de baixo custo desenvolvidas com tecnologia Brasileira.

## 7. Agradecimentos

Os autores agradecem ao IF Sudeste MG (Campus Juiz de Fora) por ter cedido aos laboratórios e instrumentos utilizados nestes testes, a Fundação TUPY S/A e a Sandvik.

## 8. Referências Bibliográficas

- [1] ACCHAR, W. Materiais Cerâmicos: Ciência e Tecnologia, EDUFRRN, Rio Grande do Norte, p. 13-14, 111, 2000.
- [2] DORÉ, C.; BAGETTI, J.H.; BOEHS, L.; GUESSER, W.L.; BRESSIANI, A.H.A. Avaliação do desempenho de ferramentas de cerâmica  $Al_2O_3+Y_2O_3+NBC$  na usinagem de ferro fundido vermicular, anais COBEF 2007.
- [3] SOUZA, J.V.C.; CRNKOVIC, S.J.; KELLY, C.A.; MOREIRA, M.R.V.; RIBEIRO, M. V.; SILVA, O.M.M. 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.
- [4] MONDAL B. Zirconia toughened alumina for wear resistant engineering and machinability of steel application. Adv Appl Ceram 2005;104(5):256-60.
- [5] SOUZA, J.V.C.; NONO, M.C.A.; RIBEIRO, M.V.; MACHADO, J.P.B.; SILVA, O.M.M. Cutting forces in turning of gray cast iron using silicon nitride based cutting tool, Materials & Design, v.30, (2009), pp. 2715-2720.
- [6] ACCHAR, W., Materiais Cerâmicos: Ciência e Tecnologia, EDUFRRN, Rio Grande do Norte, p. 13-14, 111, 2000.
- [7] LANNA, M. A., et al. Otimização de custos de produção de ferramentas utilizando sinterização normal. Anais do 48o Congresso Brasileiro de Cerâmicas, 2004
- [8] 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.

- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] ASTM: C1327-99, “Standard test method for Vickers indentation hardness of advanced ceramics”, pp. 1-8, 1999.
- [13] ASTM: C-1421-99, “Standard test method for determination of fracture toughness of advanced ceramics at ambient temperature”, pp. 1-32, 1999.
- [14] Diniz, A. E; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. São Paulo: M.M., 2013.
- [15] FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. 5 ed. São Paulo: Blucher, 1977.