

USINAGEM A VERDE APLICADA NA MELHORIA DO ACABAMENTO SUPERFICIAL DE CERÂMICAS SINTERIZADAS

G. Bukvic⁽¹⁾; L. E. A. Sanchez⁽²⁾; C. A. Fortulan⁽¹⁾; A. A. Fiocchi⁽¹⁾.

(1) Departamento de Engenharia Mecânica – EESC – USP.

(2) UNESP - Univ Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica.
Av. Trabalhador São Carlense – 400 – CP 359 – 13560-970 – São Carlos - SP
bukvic@usp.br

RESUMO

A usinagem de cerâmicas avançadas geralmente é feita com o objetivo de dar acabamento nas peças após a etapa de sinterização, mas esbarra em condições limites de remoção de material. Uma alternativa é a usinagem da peça no estado verde, a qual apresenta fácil remoção de material com a diminuição da introdução de defeitos prejudiciais à resistência mecânica. O presente trabalho analisou a influência da remoção de sobrematerial de peças no estado verde no acabamento final das peças sinterizadas. Corpos-de-prova cilíndricos de alumina, com 99,8% de pureza, conformados por prensagem uniaxial de simples ação, foram torneados com sobremateriais de 1,0, 2,0, 3,0, 4,0 e 5,0 mm por uma ferramenta de metal duro sob condições constantes de usinagem. Os parâmetros analisados foram: desgaste de flanco máximo (VB_{max}), força de corte (F_c) e rugosidade média aritmética (Ra). Os resultados apontam influência do gradiente de densidade da peça no desgaste da ferramenta, na força de corte e na rugosidade da peça em verde e na correspondente peça sinterizada. A usinagem a verde promove a melhora do acabamento superficial da peça sinterizada.

Palavras-chave: usinagem a verde, cerâmica avançada, gradiente de densidade, prensagem uniaxial.

INTRODUÇÃO

Trabalhos realizados com cerâmica têm sido concentrados na usinagem de acabamento de peças sinterizadas⁽¹⁾, porém para a manufatura de formas complexas não é a melhor opção, devido a ocorrência de lascamentos e trincas, tanto superficiais quanto sub-superficiais, gerados durante o processo de usinagem⁽²⁾.

Uma alternativa é a usinagem de peças cerâmicas em seu estado não sinterizado, também chamado de estado verde⁽¹⁾. A usinagem a verde agrega recursos aos métodos de conformação que sozinhos não são capazes de produzir

geometrias intrincadas de compactados⁽³⁾. Os processos de usinagem são possíveis devido a baixa resistência mecânica apresentada pelo estado verde do material, permitindo o uso de ferramentas de geometria definida e proporcionando altas taxas de remoção de material em comparação com a retificação de sinterizados^(4,5).

A usinabilidade de uma peça cerâmica em verde é dependente de suas características e das condições de usinagem. A peça deve possuir ligação mecânica suficiente entre as partículas através da utilização de aglomerantes para evitar lascamentos na usinagem⁽⁶⁾. A melhora da usinabilidade, resistência e plasticidade da peça podem ser ajustadas pelo tipo e quantidade de aglomerante. O PVAI e emulsões acrílicas são exemplos de aglomerantes de alta resistência⁽⁷⁾.

Na usinagem a verde, os parâmetros de corte devem ser cuidadosamente controlados para evitar danos ao material, tendo a velocidade de corte limitada em operações de torneamento devido a força centrífuga máxima permitida, a qual é determinada pela resistência mecânica da peça em verde⁽³⁾.

Quanto às forças de usinagem, elas tendem a aumentar com o desgaste da ferramenta de corte, principalmente se ela for feita de aço rápido, ou mesmo de metal duro quando usada em alguns tipos de cerâmicas mais abrasivas. SHEPPARD (1999) e NG et al. (2006) citam que desgastes de flanco maiores que 0,1 mm já podem causar danos superficiais à peça devido a excessiva pressão específica de corte criada pela área de contato.

Vários estudos consideram a influência dos parâmetros de usinagem, como a velocidade de corte, o avanço e a profundidade do corte, na força de usinagem, na rugosidade e na resistência mecânica da peça em verde. Alguns autores, como JANASOVITS (1999) e KONIG e WAGEMANN (1993), utilizam o desgaste da ferramenta como um indicador de usinabilidade, no entanto, o melhor critério é o nível de qualidade superficial das peças após a usinagem, porém esta característica é muito subjetiva e difícil de quantificar. A geração de defeitos parecidos com escamas é geralmente considerada um problema importante e pode levar ao descarte da peça. A retenção da borda também é usada para caracterizar a usinabilidade, constituindo em mais um elemento de análise da peça durante a usinagem⁽¹¹⁾.

Na manufatura da peça cerâmica, a etapa de compactação contribui na resistência mecânica e no tempo de sinterização da peça, uma vez que são criadas grandes tensões entre as partículas que a constituem⁽¹²⁾. No entanto, durante a

compactação, o atrito entre as partículas do pó e também o atrito entre elas com a superfície do molde impedem que a pressão aplicada a uma ou mais superfícies da peça seja integral e uniformemente distribuída em todas as regiões da peça, o que provoca a existência de gradientes de densidade nas peças conformadas, resultando na distorção do mesmo durante a sinterização⁽¹³⁾. Diversos autores, como BENCOE, 2008; ALBARO, 2001; MAIER e MICHAELI, 1996; RICHERSON, 1992 e WESTERHEIDE et al., 1996, identificaram menores variações nos gradientes de densidades a medida que se avança em direção ao centro da peça, formando uma região de compactação mais uniforme e teoricamente menos propensa a deformações com a sinterização.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o processo de usinagem a verde de peças cilíndricas de alumina, conformadas por prensagem uniaxial de simples ação, monitorado a força de corte e acompanhado o desgaste da ferramenta, no qual se verificou a sua influencia sobre o acabamento superficial da peça em verde e, principalmente, sobre o acabamento da peça depois de sinterizada. Isto se torna especialmente importante em casos no qual as peças sinterizadas podem ser utilizadas sem a necessidade de usinagem.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foi proposto a conformação de corpos-de-prova cilíndricos por prensagem uniaxial de simples ação, com a relação entre diâmetro por comprimento de 1:1,5, realçando o gradiente de densidade. A escolha pela alumina deve-se ao fato de se tratar de um material cerâmico tido como universal, além de sua alta dureza que promoverá um maior desgaste da ferramenta de corte.

Para a fabricação dos corpos-de-prova cerâmicos, foi utilizado uma mistura de alumina com aglomerantes realizada em moinho de bolas com elementos cilíndricos de zircônia ($\varnothing 12,0 \times 20,0$ mm). Uma suspensão com 30 % em volume de alumina em pó foi dispersa num volume de 68 % de água destilada e deionizada e acrescentados 1 % em volume de PVAI e o restante, 1 % em volume, de poliacrilato de amônia (Dispersal 130). Em seguida a mistura foi seca pela técnica de “spray dryer”, produzindo partículas com fluidez necessária para um eficiente preenchimento de moldes.

A Tabela 1 traz a composição da cerâmica empregada no trabalho, que se trata da Alumina Calcinada A1000-SG (Almatis, Inc.) com partículas de 0,4 μm de diâmetro médio equivalente, área superficial de 7,7 mm^2/g e $\rho_{\text{real}} = 3,99 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 1 - Composição química da alumina utilizada, % em peso.

Al_2O_3 %	SiO_2 %	Fe_2O_3 %	Na_2O %	CaO %	B_2O_3 %	MgO %
99.8	0.03	0.02	0.07	0.02	0.001	0.04

O pó produzido foi então conformado em uma matriz por prensagem uniaxial de simples ação, sob pressão de 120,0 MPa, fornecendo corpos-de-prova, no estado verde, de formato cilíndrico com dimensões aproximadas de $\varnothing 25,0 \times 39,0$ mm.

A usinagem dos corpos-de-prova foi realizada em uma fresadora universal adaptada para o torneamento e com o auxílio de um dispositivo, que foi especialmente construído para o trabalho tendo como principais características a alta rigidez e a capacidade para fixação de uma célula de carga, a qual foi utilizada como um porta-ferramenta para a fixação da ferramenta de corte, como o observado na Figura 1.

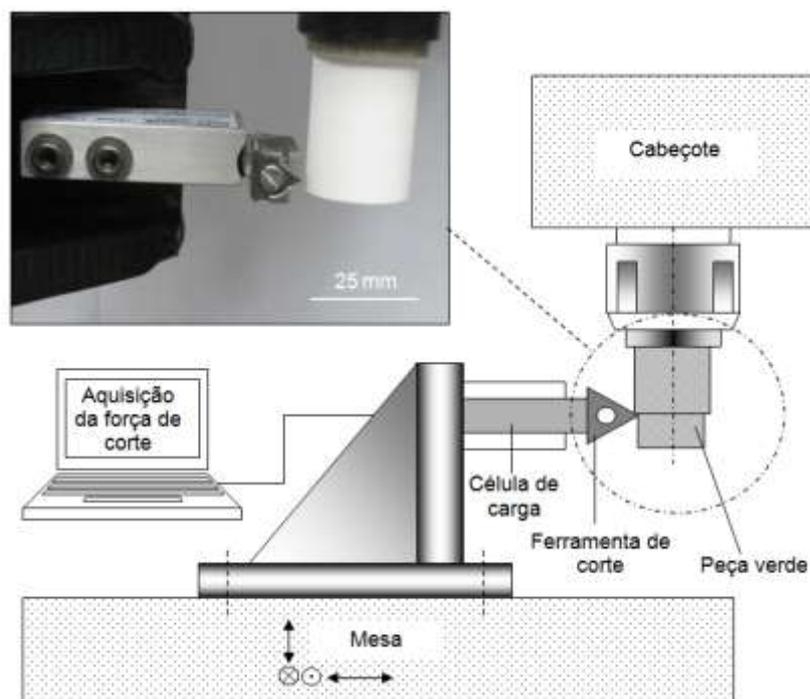


Figura 1 - Montagem esquemática do banco de ensaio de usinagem

A ferramenta de corte usada para torneiar as amostras foi de metal duro sem revestimento e sem quebra-cavacos, comercializada pela Kyocera sob designação TPGB 1102005, de Classe K10 e raio de ponta de 0,05 mm. Em conformidade com a Norma ISO 3685, o final de vida da ferramenta é alcançado quando o desgaste de flanco máximo (VB_{max}) atinge 0,4 milímetros.

Os parâmetros de entrada dos ensaios foram conduzidos segundo cinco valores diferentes de sobrematerial de torneamento: 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 e 5,0 mm. A remoção desses sobremateriais foi realizada sob parâmetros de usinagem fixos, sendo esses: profundidade de corte (a_p) de 1,0 mm, rotação (n) de 1000 rpm e velocidade de avanço (f) de 22,4 mm/min.

Esses valores foram escolhidos dentre uma gama de valores testados que produziu um melhor acabamento superficial como é mostrado na figura 2c. A Figura 2 apresenta oito imagens das superfícies usinadas, produzidas com diferentes valores de f e n , mantendo fixo o a_p igual a 1,0 mm, que foram observados com o auxílio de imagens obtidas por meio de um estéreo microscópio ótico da marca Nikon, modelo SMZ800, acoplado a uma câmara digital de alta resolução.

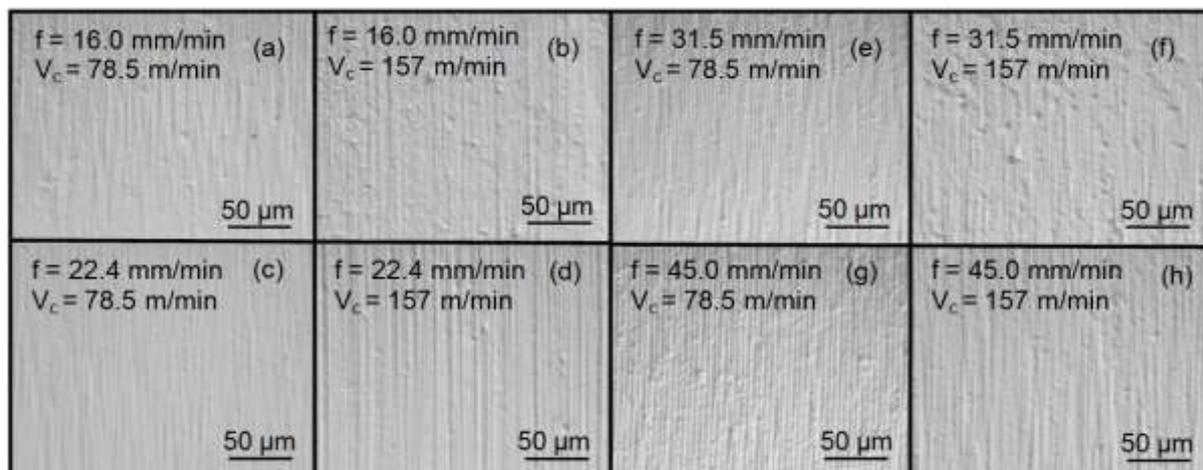


Figura 2 – Superfícies dos corpos-de-prova usinadas a verde, com diferentes acabamentos, obtidos sob diferentes condições de usinagem.

Levando-se em consideração que a técnica usada na compactação dos corpos-de-prova produz um topo e uma base com densidades diferentes. Um topo com uma maior densidade formado devido a punção superior, que aplica toda a pressão exercida pela prensagem, e uma base de menor densidade formada devido a punção inferior, que recebe a pressão da prensagem com grande perda devido ao

atrído do sistema^(14,15,16), o procedimento do ensaio de usinagem dos sobremateriais dos corpos-de-prova foi realizado tomando como referência o lado do topo e o lado da base.

Foram usinados pelo topo três corpos-de-prova em verde, para cada valor de sobrematerial, e outros três corpos-de-prova usinados pelo base, também para cada valor de sobrematerial, com um total de trinta corpos-de-prova utilizados para o ensaio de usinagem. Outros três corpos-de-prova foram deixados sem usinagem para serem usados como referência.

Para cada corpo-de-prova foi utilizada uma nova aresta de corte da ferramenta, assim, levando em consideração o $a_p = 1,0$ mm foram obtidas arestas submetidas ao número de passes equivalentes ao valor do sobrematerial, ou seja, para o sobrematerial de 1,0 mm, a aresta de corte foi utilizada para um passe, e nos outros sobremateriais de 2,0, 3,0, 4,0 e 5,0 mm, foram realizados dois, três, quatro e cinco passes, respectivamente. Dessa forma, cada aresta de corte da ferramenta teve um determinado valor de VB_{max} , com um respectivo comportamento observado na medição da F_c de cada sobrematerial em função do lado de referência.

Uma célula de carga da marca *R&S*, modelo MB, foi utilizada para medir a F_c durante a usinagem, e essa teve os sinais de dados coletados por um sistema de aquisição da *National Instruments*® e o programa computacional *Labview*® 7.1.

Para a medição do VB_{max} , imagens das pontas das ferramentas de corte foram obtidas por meio de um estéreo microscópio, juntamente com a imagem de uma escala obtida com o mesmo aumento utilizado para as ferramentas, e com o auxílio do programa computacional *AutoCad*®, foi possível a obtenção das medidas de desgaste com precisão.

A rugosidade média aritmética (R_a) foi medida em um rugosímetro óptico, sem contato, da marca *Veeco*®, modelo *Wyko*® NT 1100, uma vez que um apalpador mecânico poderia produzir um risco na superfície da peça em verde e, assim, ter a medida mascarada.

O processo de sinterização dos corpos-de-prova foi feito em um forno elétrico do tipo câmara, da marca *Lindberg Blue*®, com uma rampa de aquecimento, patamar e rampa de resfriamento, com duração total de 900 minutos, e temperatura máxima de 1600 °C com um patamar de 120 minutos de duração. O tempo e a temperatura descritos foram os necessários para alcançar as características de sinterização

requeridas para o material da peça, como o aumento do tamanho de grão necessário e alcançar a melhor resistência mecânica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No gráfico da Figura 3 é mostrado o comportamento da F_c na usinagem, em cada um dos cinco valores diferentes de sobrematerial, com valores RMS (*Root Mean Square*) e o desvio padrão. Pode ser observado que F_c foi crescente em função do maior número de passes efetuado pela ferramenta, fato que também pode ser explicado em função do desgaste crescente da mesma.

Com relação ao lado do corpo-de-prova usinado, o topo necessitou de uma maior força para a realização da usinagem que a base, demonstrando que a variação da densidade exerce grande influência nas variáveis de saída da usinagem.

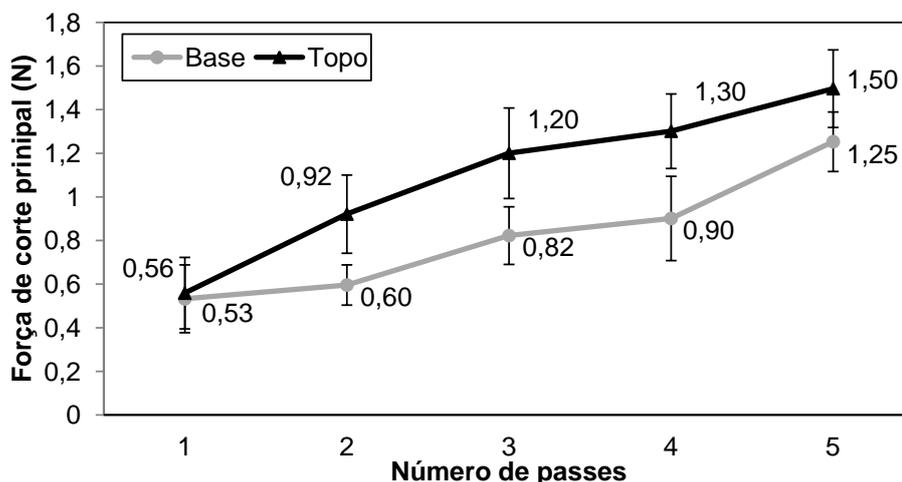


Figura 3 - Valor RMS da F_c em função do número de passes.

Na Figura 4 é apresentado o valor do VB_{max} com o correspondente número de passes de usinagem necessários para a remoção do material total dos corpos-de-prova de cada condição. A influência da diferença de densidade da peça também foi determinante no desgaste da ferramenta, sendo maior o desgaste quando feita a usinagem pelo topo do corpo-de-prova.

Apesar do aumento do desgaste da ferramenta e de uma maior F_c durante a usinagem pelo topo, a medição da rugosidade foi melhor, como pode ser visto no gráfico da Figura 5. Uma explicação possível seria o fato de o topo, com a sua densidade relativamente maior, não gerar o desprendimento involuntário de grãos,

um fato que pode ser maior na base, gerando um pior acabamento nas primeiras medições de desgaste. A Rugosidade diminui em todas as peças após a sinterização e o melhor acabamento superficial obtido nas amostras sinterizadas, foi correspondente com a melhor acabamento superficial verde. Esta diferença pode ser creditada à minimização de defeitos de superfície, após a sinterização devido ao fato de o mecanismo de sinterização causar a coesão da estrutura granular, dessa forma, reestabelecendo a estrutura de superfície.

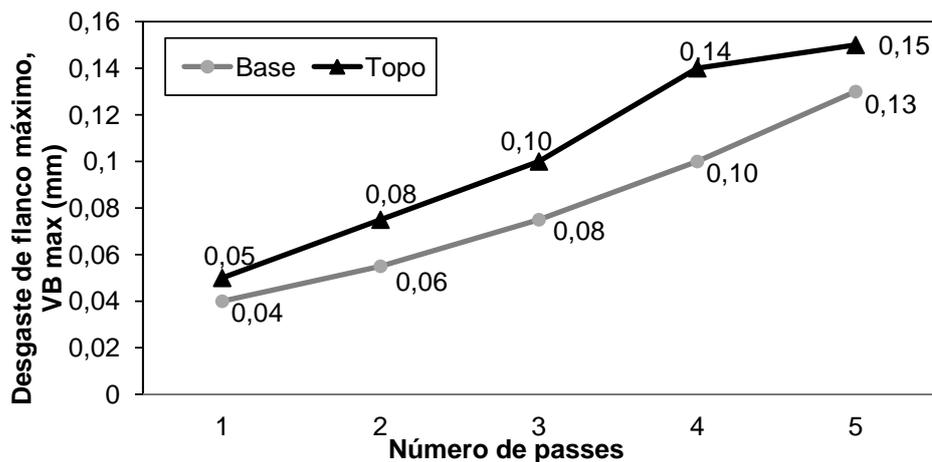


Figura 4 - Desgaste da ferramenta em função do número de passes executados.

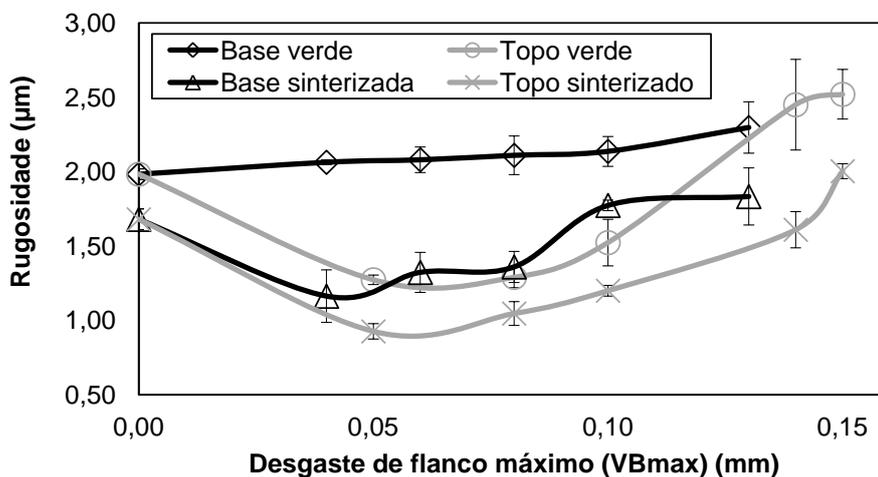


Figura 5. Rugosidade das peças verdes e após a sinterização no final de cada sobrematerial.

Imagens obtidas por MEV das peças sinterizadas não usinadas e usinadas pelo topo, mostra na imagem (a) os riscos deixados pelo molde na peça sem

usinagem. Em seguida para as imagens (b), (c), (d), (e) e (f), sendo as peças submetidas à remoção dos sobremateriais de 1,0, 2,0, 3,0 4,0 e 5,0 mm, respectivamente, é possível observar os riscos deixados pela ferramenta e um aspecto visual da superfície se tornando grosseiro, sendo possível observar a introdução de possíveis defeitos como a remoção de aglomerados e o deslocamento e arrastamento de aglomerados de grãos, formando uma superfície com aspecto parecido com escamas, causado pelo desgaste progressivo da ferramenta e o aumento da F_c , em função do número de passes necessário para alcançar cada remoção do sobrematerial, conforme o observado na Figura 6.

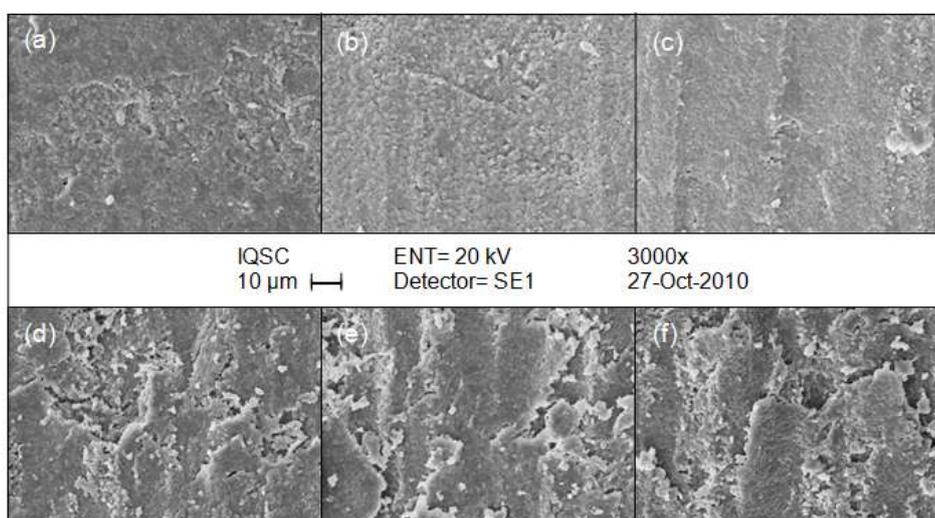


Figura 6 - MEV das superfícies sinterizadas (a) não usinada e usinadas com os sobremateriais de (b) 1,0 mm, (c) 2,0 mm, (d) 3,0 mm, (e) 4,0 mm e (f) 5,0 mm, pela base mais compactada.

Para as imagens obtidas por MEV das peças sinterizadas não usinadas e usinadas pela base, mostra na imagem (a) da peça sem usinagem os riscos deixados pelo molde. Em seguida para as imagens (b), (c), (d), (e) e (f), sendo as peças submetidas à remoção dos sobremateriais de 1,0, 2,0, 3,0 4,0 e 5,0 mm, respectivamente, é possível observar os riscos deixados pela ferramenta e um aspecto visual da superfície menos grosseiro que o observado com a usinagem pela base mais compactada, porém foi possível observar a introdução de possíveis defeitos como o deslocamento e arrastamento de aglomerados de grãos, formando uma superfície com aspecto parecido com escamas, além disso, na imagem (f) ainda foi observado o aparecimento de pequenas fissuras apontadas na imagem,

além do efeito do desgaste progressivo da ferramenta, em função dos sobremateriais removidos, sendo ainda observado na perda da uniformidade do aspecto visual das peças, de acordo com a Figura 7.

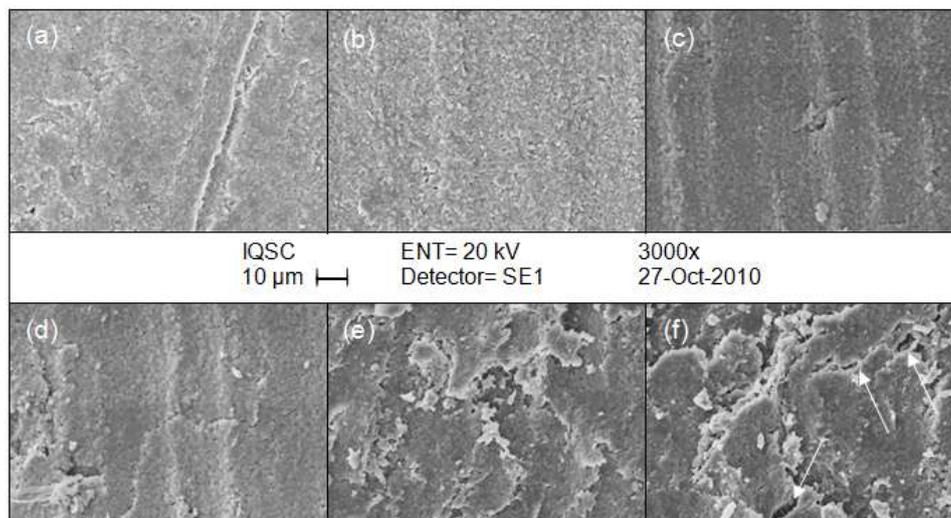


Figura 7 - MEV das superfícies sinterizadas (a) não usinada e usinadas com os sobremateriais de (b) 1,0 mm, (c) 2,0 mm, (d) 3,0 mm, (e) 4,0 mm e (f) 5,0 mm, pela base menos compactada.

CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos nesse trabalho, pode-se concluir que:

- O acabamento superficial da peça em verde tem influência direta na peça sinterizada, sendo que a usinagem do compactado em verde é benéfica na redução da rugosidade da peça sinterizada;

- O desgaste da ferramenta de corte tem influência direta na rugosidade das peças usinadas e o mecanismo de desgaste predominante observado foi do tipo abrasivo;

- A diferença de densidade gerada pelo processo de compactação, influenciou significativamente a força de corte, o desgaste da ferramenta e o acabamento superficial da peça, tornando-se fator de importância na questão de vida da ferramenta e parâmetros de usinagem;

A melhora do acabamento superficial, devido à usinagem a verde, vislumbra a possibilidade da aplicação direta do produto após a sinterização, sem a necessidade de outra etapa subsequente de usinagem, dependendo da sua aplicação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CAPES pela concessão do projeto Pró Engenharias nº PE 0652008 481500/2007-3 e pela de bolsa de doutorado e ao CNPq - projeto Universal (479041/2009-1).

REFERÊNCIAS

- (1) KLOCKE, F.; GERENT, O.; SCHIPPERS, C. Machining of advanced ceramics in the green state. *Ceramic Forum International*, v. 74, n. 6, p. 288-290, 1997.
- (2) DHARA, S.; SU, B. Green machining to net shape alumina ceramics prepared using different processing routes. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, v. 2, n. 3, p. 262-270, 2005.
- (3) SHEPPARD, L. M. Green machining: tools and considerations for machining unfired ceramic parts. *Ceramic Industry*, v. 149, n. 6, p. 65-77, 1999.
- (4) MAIER, H. R.; MICHAELI, N. Green machining of alumina. *Key Engineering Materials*, v. 132-136, p. 436-439, 1997.
- (5) JANSSEN, R.; SCHEPPOKAT, S.; CLAUSSEN, N. Tailor-made ceramic-based components—Advantages by reactive processing and advanced shaping techniques. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 28, p. 1369-1379, 2008.
- (6) KOH, Y.; HALLORAN, J. W. Green machining of a thermoplastic ceramic-ethylene ethyl acrylate/isobutyl methacrylate compound. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 87, n. 8, p. 1575-1577, 2004.
- (7) KING, G. A. *Ceramic technology and processing*. Noyes Publication: William Andrew Publishing, Norwich, New York. 528 p. ISBN 0-8155-1443-3, 2002.
- (8) NG, S.H.; HULL, J.B.; HENSHALL, J.L. Machining of novel alumina/cyanoacrylate green ceramic compacts. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 175, p. 299-305, 2006.
- (9) JANASOVITS, U. et al. Improvement of green machining process of Si₃N₄. *Ber. Deutsche Keramische Gesellschaft*, v. 76, n. 5, p. 24-28, 1999.
- (10) KONIG, W.; WAGEMANN, A. Machining of ceramic components: process-technological potentials. *Proceedings of the International Conference on Machining of Advanced Materials*, July 20-22, U.S., Gaithersberg, NIST Special Publication v. 847, p. 3-16, 1993.

- (11) DESFONTAINES, M. et al. Characterisation of the green machinability of AlN powder compacts. Journal of the European Ceramic Society, v. 25, p. 781-791, 2005.
- (12) GROENOU, A. B. V. Compaction of ceramic powders. Powder Technology, v. 28, p. 221-228, 1981.
- (13) ALBARO, J. L. A. A operação de prensagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial. Parte v: descrição da etapa de prensagem. Cerâmica Industrial, v. 6, 2001.
- (14) BENCOE, D. N.; DIANTONIO, C. B.; EWSUK K. G. Density gradient evolution in alumina powder compacts during sintering. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185-1349, 2008.
- (15) RICHERSON, D. W. Modern ceramic engineering: properties, processing and use in design. 2nd edition, Marcel Dekker, Inc. USA, 1992.
- (16) WESTERHEIDE, R. et al. Advances in characterization of machined green compacts. Journal of the European Ceramic Society, v. 17, p. 467-472, 1996.

GREEN MACHINING APPLIED TO THE IMPROVING OF SURFACE FINISH IN SINTERED CERAMICS

ABSTRACT

The machining of advanced ceramics is usually done in order to give finishing to the pieces after the sintering step, but collides with material limits removal conditions. An alternative is to machine the part in the green state, which provides easy material removal with reduced introduction of referred defects to the mechanical strength. The present study examined the influence of the removal of material allowance in the green state in finishing of sintered parts. Alumina cylindrical specimens, with 99.8% purity, single action uniaxially pressed, were turned with allowance of 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 and 5.0 mm by a carbide tool under constant machining conditions. The parameters analyzed were maximum flank wear (VBmax), cutting force (Fc) and arithmetic average roughness (Ra). The results show the influence of piece density gradient on the tool wear, on the cutting force and on the green specimens roughness and in the corresponding sintered part. The green machining promotes the improvement of the surface finish of the sintered part.

Key-words: green machining, advanced ceramics, density gradient, uniaxial pressing.