

AVALIAÇÃO DA USINAGEM EM VERDE ORIENTADA À MINIMIZAÇÃO DA DISTORÇÃO E RUGOSIDADE DE PEÇAS SINTERIZADAS

G. Bukvic¹; L. E. de A. Sanchez²; C. A. Fortulan³; A. A. Fiocchi⁴; M. I. J. Sarni⁵.

¹UNESP - Univ Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube 14-01, CEP 17033-360, Bauru – SP, A/C DEM, gill@feb.unesp.br; ²UNESP - Univ Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica; ³Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos; ⁴UNESP - Univ Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica; ⁵UNESP - Univ Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica.

RESUMO

A usinagem de cerâmicas avançadas é feita com o objetivo de corrigir as deformações dimensionais de peças sinterizadas. Para cumprir esta tarefa são utilizadas condições bem específicas de usinagem evitando a introdução de defeitos. Uma alternativa é a usinagem da peça ainda compactada, chamada em verde, a qual apresenta fácil usinagem. Mas após a sinterização distorções ocorrem devido à presença de gradientes de densidade, os quais se localizam nas porções mais externas do compactado. Nesse trabalho, esses gradientes são removidos sob diferentes valores de sobrematerial e avaliada a correspondente distorção da peça após a sinterização. Juntamente foi analisado o desgaste da ferramenta, força de corte e rugosidade do compactado em verde e sinterizado. Como resultado, verifica-se a menor distorção da peça sinterizada com o maior valor de remoção de sobrematerial em verde, e a influência do desgaste da ferramenta na rugosidade da peça em verde e na correspondente peça sinterizada.

Palavras-chave: Usinagem a verde; Gradiente de densidade; Distorção; Prensagem uniaxial; Cerâmica.

INTRODUÇÃO

A usinagem por meio de ferramenta de diamante, como a retificação, é a principal maneira de atingir as dimensões desejadas e o acabamento da superfície das peças cerâmicas sinterizadas. No entanto, devido à sua alta fragilidade, os

componentes invariavelmente sofrem danos, como trincas superficiais e/ou subsuperficiais, durante o processo de remoção de material, resultando em perda de resistência mecânica. Além disso, a exigência de máquinas-ferramenta de alta rigidez e ferramentas de corte de diamante torna caro o processo de remoção de material das cerâmicas avançadas (Strakna et al., 1996; Mayer et al., 1995).

Na tentativa de contornar esses problemas envolvendo a usinagem de cerâmicas, pode-se lançar mão do uso da técnica da usinagem da peça compactada, em seu estado não sinterizado. Com isso pode-se produzir formas complexas, detalhes e também deixá-las com dimensões mais próximas possíveis das medidas finais, prevendo, evidentemente, a contração inerente à fase de sinterização. Este processo requer menos energia, torna a operação de usinagem mais fácil e menos dispendiosa do que após a peça já sinterizada, uma vez que no estado em verde elas possuem baixa resistência mecânica conferindo boa usinabilidade (Su et al., 2008 e Ekabaram, 2008).

Verifica-se que na prensagem do pó ocorre intenso atrito entre as partículas adjacentes e de maneira mais intensa ainda com a parede do molde. Como resultado, tem-se um preenchimento heterogêneo na cavidade do molde, obtendo-se uma peça compactada com vários gradientes de densidade (Albaro, 2001; Richerson, 1992). A existência desses gradientes faz com que a sinterização em cada correspondente região sofra contração volumétrica de diferente intensidade e, conseqüentemente, com valores de contrações variados levando a deformação da peça sinterizada (Bencoe et al., 2008).

No trabalho de Westerheide et al. (1996), é feita uma análise numérica da variação da densidade no compactado em verde, cujo resultado mostra que as densidades nos planos da superfície superior e inferior da peça, embora diferentes, convergem para valores próximos à medida que se caminha em direção ao centro da peça. Diante deste resultado, os autores sugerem a usinagem de um sobrematerial suficientemente grande para remover a porção da peça em verde onde contém os maiores gradientes de densidade e, como conseqüência desta prática, a peça sinterizada sofreria menor distorção. De fato, observações semelhantes já haviam sido feitas por Richerson (1992) que na Figura 1 ilustrou os gradientes de densidade em uma peça cerâmica em verde compactada uniaxialmente pelo método de simples ação, no qual apenas um punção se movimentava em relação ao molde. Nesta representação são mostrados os valores de

densidades mais altas na porção superior da peça do que na inferior onde é comum se observar avarias.

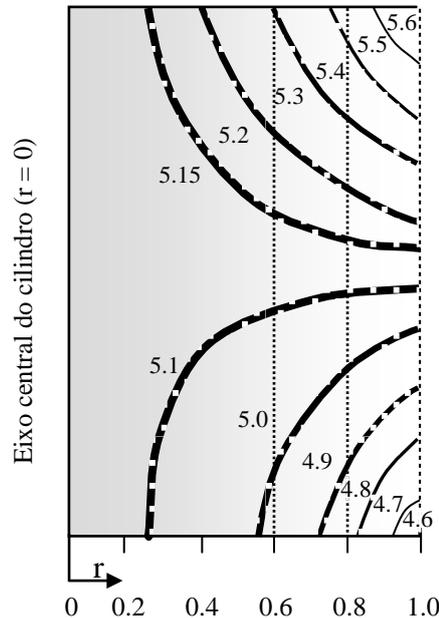


Figura 1. Gradiente de densidade em peça prensada uniaxialmente.

Muitos problemas envolvendo a usinagem em verde de cerâmicas são apontados por Desfontaines et al. (2004), dentre eles a baixa resistência mecânica do compactado, que pode vir a não resistir as forças de usinagem e a força exercida sobre a peça na sua fixação na máquina. Quanto às forças de usinagem, elas tendem a aumentar com o desgaste da ferramenta de corte. Ng et al (2006), cita que desgastes de flanco maiores que 0.1 mm já podem causar danos superficiais à peça devido ao excesso de pressão específica de corte.

O principal objetivo deste trabalho é verificar o efeito da remoção de material em compactados não sinterizados na distorção gerada nas mesmas peças após a sinterização. Deste modo, são usinadas várias peças em verde, obtidas por prensagem uniaxial, com valores crescentes de remoção de sobrematerial. Como conseqüência, busca-se em cada peça, a progressiva diminuição do gradiente de densidade localizada nas camadas mais externas das peças e a correspondente redução da distorção dimensional de peças sinterizadas de alumina. Como resultado, pretende-se minimizar a usinagem nas peças sinterizadas, com a finalidade de correção de dimensão, ou mesmo eliminá-la em aplicações onde o nível de exigência permitir. Ao mesmo tempo, deseja-se acompanhar o desgaste da ferramenta de corte e sua influencia sobre o acabamento superficial da peça em

verde e, principalmente, sobre o decorrente acabamento da peça sinterizada. Isto se torna especialmente importante em casos nos quais as peças sinterizadas podem ser usadas sem a necessidade de usinagem.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os corpos-de-prova são feitos em alumina com 99.9% de pureza, com forma cilíndrica de dimensões aproximadas de $\varnothing 15 \times 19$ mm, conformados por prensagem uniaxial de simples ação sob pressão de 120 MPa. Eles foram torneados com uma ferramenta de corte de metal duro sem revestimento e sem quebra-cavacos, 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 máx) atinge 0.4 milímetros.

Os parâmetros de entrada dos ensaios foram conduzidos segundo quatro valores diferentes de sobrematerial de torneamento: 0.25 mm; 0.50 mm; 0.75 mm; e 1.00 mm. Cada sobrematerial foi removido em diversos passes sob uma profundidade de usinagem de 0.1 mm, velocidade de corte de 66 m/min e velocidade de avanço de 8 mm/min. Estes valores foram selecionados dentre uma gama de valores testados, mas que produziam danos superficiais excessivos na peça, especialmente o destacamento de aglomerados de grãos. Na Figura 2 são mostrados três exemplos de superfícies usinadas, uma sob condições de corte não apropriadas (figura 2a), outra parcialmente apropriada (figura 2b), e a última sob condição adequada e por isso usada nos ensaios (figura 2c).

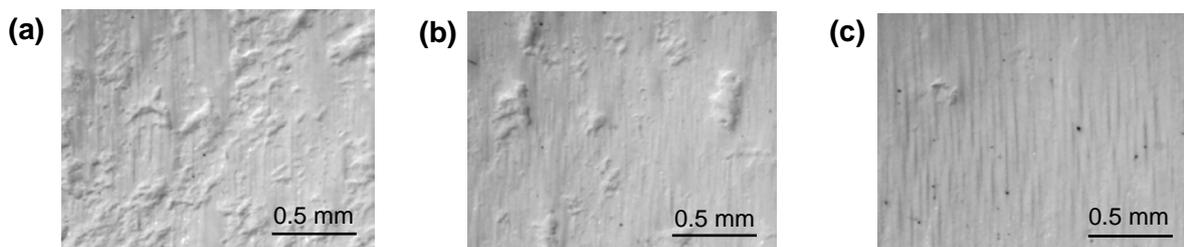


Figura 2. Superfícies de corpos-de-prova usinados em verde com acabamento considerado inadequado (a), parcialmente adequado (b) e adequado (c).

Depois de selecionados os parâmetros de corte, foram usinados cinco corpos-de-prova em verde para cada valor de sobrematerial e outros cinco corpos-de-prova foram deixados sem usinagem, para serem usados como referência. Todas as peças em verde e sinterizadas tiveram seus diâmetros medidos em uma máquina de

medição tridimensional para registrar as contrações advindas da sinterização. A rugosidade média aritmética (R_a) teve que ser 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.

Para a análise detalhada da distorção da peça, foram selecionadas cinco posições diferentes ao longo da geratriz dos corpos-de-prova e, a partir destes perímetros, medidos os respectivos diâmetros. A maior amplitude entre os valores medidos representa a distorção do corpo-de-prova após sua sinterização. A distância nas peças em verde foi de 1.5 mm e de 1.235 mm nas sinterizadas, uma vez que o valor da contração linear média encontrado foi de 17.63 % (Figura 3).

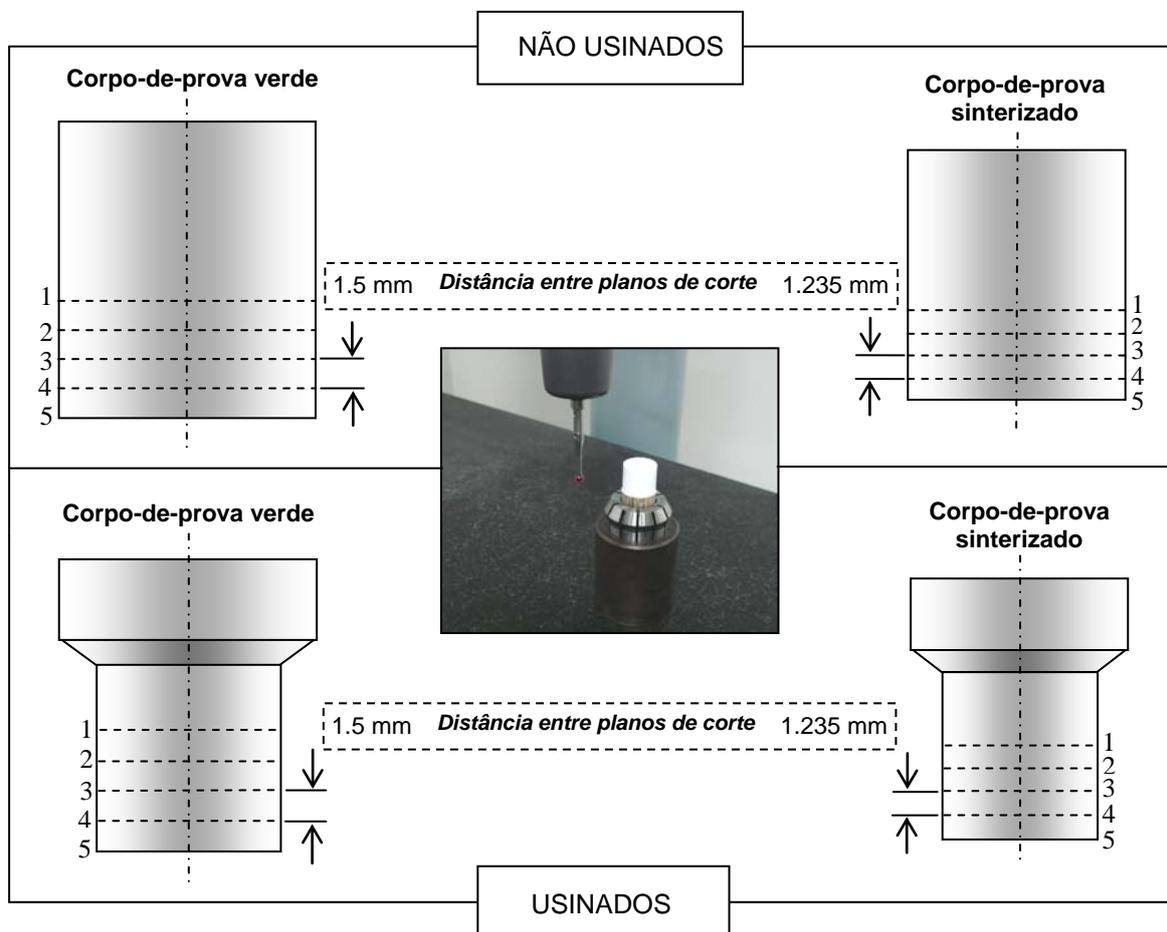


Figure 3. Locais medidos nos corpos-de-prova.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 mostra os gráficos com os valores dos diâmetros médio dos corpos-de-prova medidos ao longo de cinco posições. A Figura 4(a) refere-se à peça

compactada, em verde, enquanto que a Figura 4(b) corresponde às medidas da peça após sua sinterização. Conforme previsto, a peça sofreu contrações em todas as seções e o valor se mostrou variável segundo a posição de cada seção medida. Este resultado é apresentado no gráfico da Figura 6, no qual nota-se que a maior contração ocorreu na seção 5 onde está localizada a região com menor densidade aparente. Ao mesmo tempo, na direção decrescente das seções encontram-se valores de densidade aparente mais elevado que resultam em menores contrações no corpo-de-prova sinterizado.

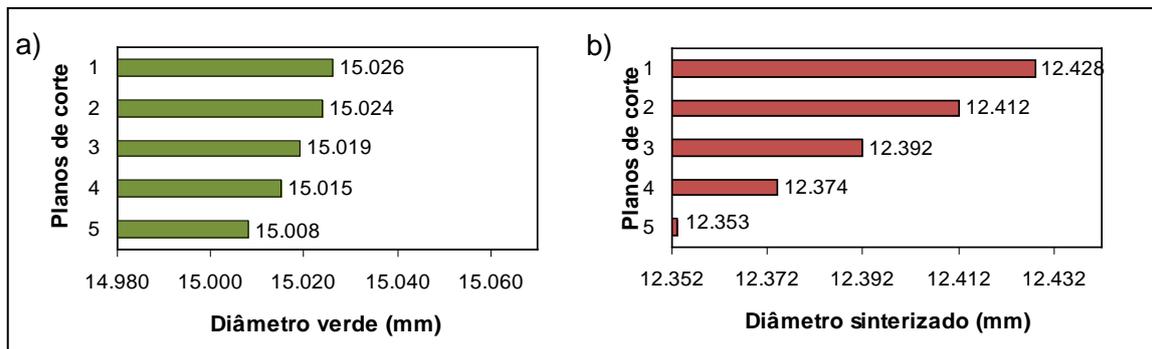


Figura 4. Diâmetros médios dos corpos-de-prova.

O gráfico da Figura 5 mostra os diâmetros médios dos corpos-de-prova usinados em verde e sinterizados, em cinco seções, com a remoção dos sobremateriais de 0.25, 0.50, 0.75 e 1.00 mm, demonstrando a diminuição dos diâmetros gerada pelo efeito da sinterização. Já o gráfico da Figura 6 mostra a contração linear média dos corpos-de-prova não usinados e usinados em verde e sinterizados, com a remoção dos mesmos sobremateriais. Nos ensaios de usinagem dos corpos-de-prova, a seção de número 5 é a mais externa e a de número 1 a mais interna, conforme é mostrado no desenho esquemático da Figura 4.

De modo geral, é possível notar que a maior distorção da peça sinterizada ocorre na situação em que ela não é usinada, anotando-se um valor médio de 0.075 mm. Com a remoção de sobrematerial o valor da distorção diminui até alcançar o menor nível, de 0.030 mm, verificado na condição de máxima remoção de material de 1.00 mm. Esta distorção também é destacadamente menor que nos casos de remoção de sobremateriais menores. Para o menor sobrematerial, de 0.25 mm, encontrou-se uma distorção de 0.051 mm, enquanto que para o sobrematerial de 0.50 e 0.75 mm obteve-se 0.66 e 0.071 mm de distorção, respectivamente.

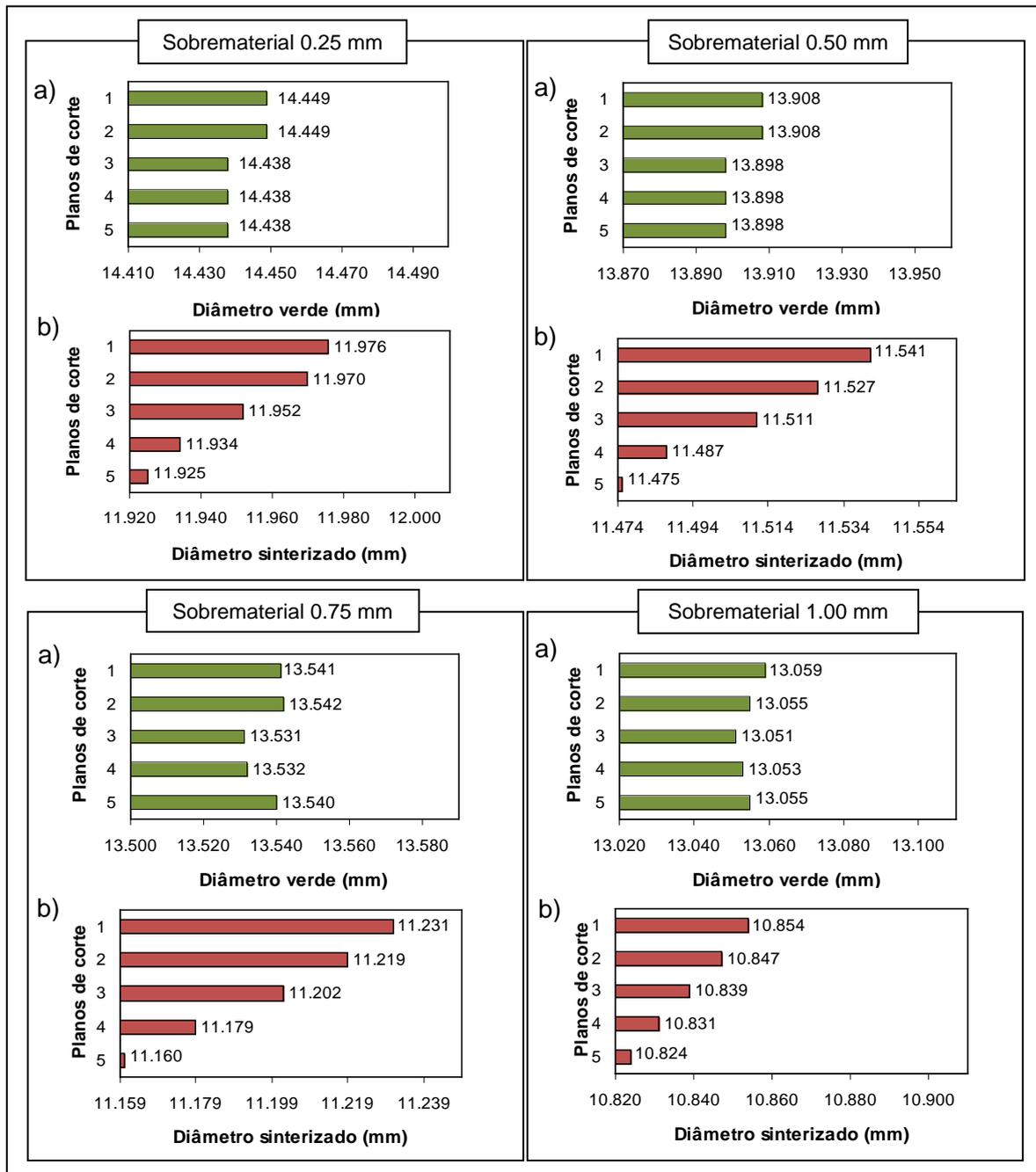


Figura 5. Diâmetros médios dos corpos-de-prova usinados em verde e sinterizado.

O fato de a destacada menor distorção ter sido conseguida com a remoção do maior sobrematerial de 1.00 mm, sugere que a partir deste valor tem-se significativa redução do gradiente de densidade no corpo-de-prova em verde e a conseqüente minimização da distorção após a sinterização. De fato, se for considerada a Figura 1 extraída de Richerson (1992) e supostos três diâmetros progressivamente menores, correspondendo a 100, 80 e 60 % do valor do raio da peça, conforme indicado nesta

mesma figura, encontra-se respectivamente 11, 8 e 5 gradientes diferentes ao longo de cada superfície remanescente.

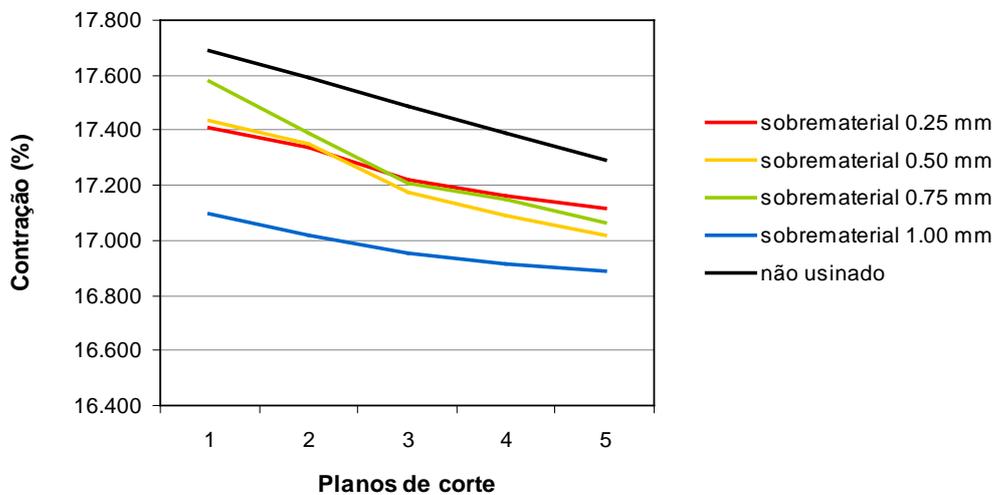


Figura 6. Contração linear média dos corpos-de-prova não usinados e usinados, em verde e sinterizado.

No gráfico da Figura 7 é mostrado o comportamento da força de corte média na usinagem de cada um dos cinco corpos-de-prova ensaiados com os quatro valores diferentes de sobrematerial. A ferramenta empregada na remoção de cada valor de sobrematerial foi a mesma, ou seja, uma ferramenta destinada para cada cinco corpos-de-prova. Assim, na condição de sobrematerial de 1.00 mm foi possível utilizar a mesma ferramenta para apenas quatro corpos-de-prova, pois durante a usinagem do quinto corpo-de-prova houve grandes danos superficiais quando também foi alcançado o critério de máximo desgaste de flanco.

Da mesma maneira que os metais, a força de corte na usinagem da alumina em verde também se mostra bastante suscetível ao desgaste da ferramenta de corte. Mesmo com baixa taxa de desgaste a força de corte é claramente crescente como, por exemplo, se constata no caso da remoção do sobrematerial de 0.25 mm no qual o desgaste de flanco ao final do quinto corpo-de-prova foi de 0.278 mm. Observação semelhante pode ser feita considerando apenas a usinagem do primeiro corpo-de-prova quando para remover os sobremateriais de 1.00, 0.75, 0.50 mm foram necessários executar quatro, três e duas vezes o número de passes usados na remoção do sobrematerial de 0.25 mm. Tendo como diferença apenas o aumento do número de passes, e conseqüentemente o desgaste da ferramenta, obtiveram-se forças médias de 1.60, 0.90, 0.80 e 0.55 N, respectivamente.

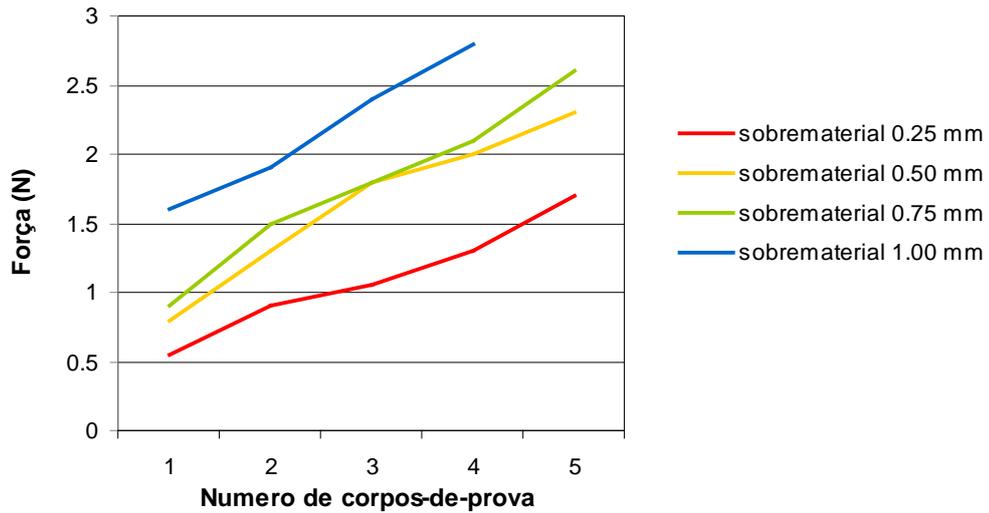


Figure 7. Força de corte para diferentes sobremateriais.

Na Figura 8 é apresentado o valor do desgaste de flanco máximo (VB máx) e a respectiva rugosidade da peça ao final de cada condição. Ao longo de todo o ensaio verificou-se, pelas imagens microscópicas, que o desgaste da ferramenta de corte foi causado por natureza abrasiva dos grãos de alumina. A ausência de qualquer avaria ou adesão de material sobre a ferramenta pode ser atribuída à baixa temperatura e força de corte envolvidos na usinagem de compactados em verde.

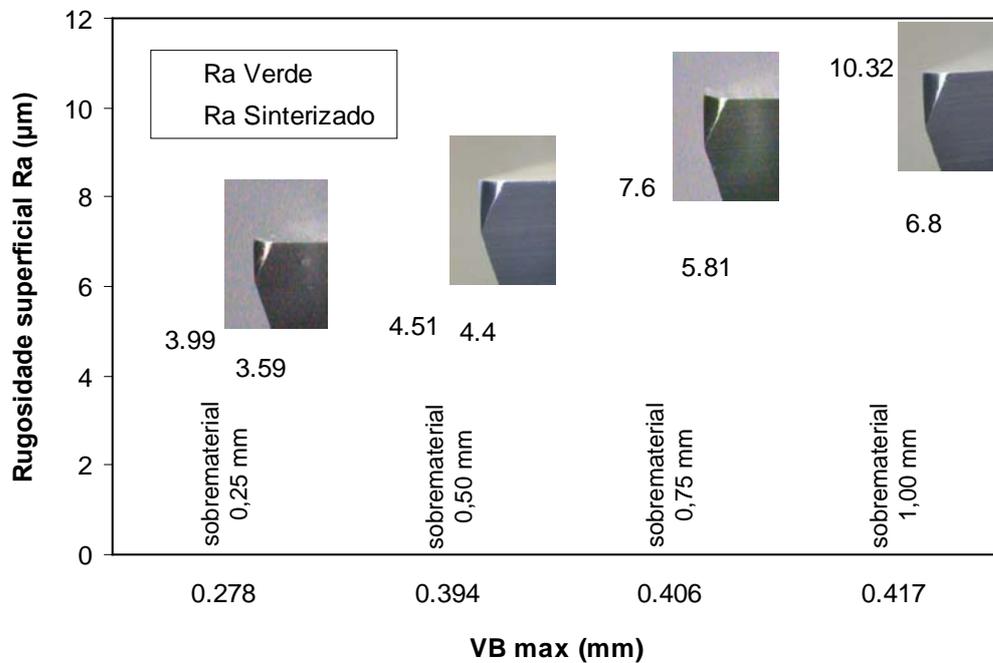


Figure 8. Rugosidade dos corpos-de-prova e desgaste da ferramenta de corte.

Verifica-se ao longo dos ensaios que a rugosidade dos corpos-de-prova usinados acompanha o desgaste da ferramenta de corte. Observa-se que os valores de rugosidade foram crescentes com o aumento do desgaste de flanco (VB max). Nota-se que em todos os sobremateriais, a rugosidade diminui após a sinterização e o melhor acabamento superficial obtido nos corpos-de-prova sinterizados foi com o correspondente melhor acabamento superficial em verde.

Por outro lado, também se pode notar que a diminuição da rugosidade é proporcionalmente maior na remoção dos sobremateriais nos quais o desgaste da ferramenta foi mais acentuado e a rugosidade destacadamente mais elevada. Para cada sobrematerial usinado, a redução média da rugosidade foi de 10% para 0.25 mm, 3% para 0.50 mm, 23% para 0.75 mm e 34% para 1.00 mm. Esta diferença pode ser creditada à maior minimização dos defeitos da superfície mais irregular em comparação com a superfície mais uniforme após a sinterização. Como o mecanismo de sinterização atua em direção à coesão da estrutura granular, a superfície da peça em verde que apresenta maiores defeitos passa por maior restabelecimento de sua estrutura do que a superfície mais uniforme que tem menores defeitos para serem minimizados.

CONCLUSÃO

A respeito dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se resumidamente concluir que:

- A redução do número de gradiente de densidade diminui a distorção das peças sinterizadas. Para isso a remoção de sobrematerial da peça em verde por meio da usinagem se mostra como boa alternativa, uma vez que na periferia dos corpos compactados estão localizadas as maiores variações de densidade que diminuem progressivamente com o raio;

- A distorção dos corpos-de-prova usinados com sobrematerial de 1.00 mm diminuiu significativamente após a sinterização

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

- O desgaste da ferramenta de corte tem influência direta na rugosidade das peças usinadas em verde e o mecanismo presente é o abrasivo.

Por fim, a partir deste trabalho e de outros citados ao longo do texto, pode-se extrair que a usinagem no estado em verde não é somente interessante para a obtenção de formas complexas de peças em estágio anterior à sinterização e/ou aproximar o compactado o máximo possível das dimensões pretendidas para a peça sinterizada, mas também para reduzir suas distorções e melhorar a rugosidade. Tornando plausível o uso de peças sinterizadas sem necessidade de usinagem final em aplicações no qual a especificação técnica permite.

REFERÊNCIAS

STRAKNA, T. J.; JAHANMIR, S.; ALLOR, R. L.; KUMAR K. V. Influence of grinding direction on fracture strength of silicon nitride. *J. Eng. Mater.Tech.*, v. 118, p. 335-342, 1996.

MAYER, J. E.; FANG, G. P. Effect of grinding parameters on strength and finishing of ceramics. In *Proceedings 1st International Machining and Grinding Conference-SME*, September, p. 151 – 164, 1995.

SU, B.; DHARA, S.; WANG, L. Green ceramic machining: A top-down approach for the rapid fabrication of complex-shaped ceramics. In. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 28, p. 2109-2115, 2008.

EKABARAM, V. Optimization of Green Ceramic Grinding. Tese. The University of Toledo, OH, 2008.

ALBARO, J. L. A. A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial. Parte V: Descrição da Etapa de Prensagem. *Cerâmica Industrial*, 2001.

RICHERSON, D. W. *Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and use in design*. 2nd edition, Marcel Dekker, Inc. USA, 1992.

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.

WESTERHEIDE, R.; DRIISEDAL, K.A.; HOLLSTEIN, T.; SCHWICKERT, T.; ZIPSE, H. Advances in Characterisation of Machined Green Compacts. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 17, p. 467-472, 1996.

MAIER, H. R.; MICHAELI, N. Green Machining of Alumina. *Key Engineering Materials*, v. 132-136, p. 436-439, 1997.

DESFONTAINES, M.; JORAND, Y.; GONON, M.; FANTOZZI, G. Characterisation of the green machinability of AlN powder compacts. Journal of the European Ceramic Society, v. 25, p. 781-791, 2004.

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.

EVALUATION OF GREEN MACHINING ORIENTED AT MINIMIZATION OF DISTORTION AND ROUGHNESS OF SINTERED PIECES

G. Bukvic¹; L. E. de A. Sanchez²; C. A. Fortulan³; A. A. Fiocchi⁴; M. I. J. Sarni⁵.

¹UNESP - Univ Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube 14-01, CEP 17033-360, Bauru – SP, A/C DEM, gill@feb.unesp.br; ²UNESP - Univ Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica; ³Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos; ⁴UNESP - Univ Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica; ⁵UNESP - Univ Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica.

ABSTRACT

The machining of advanced ceramics is performed in order to correct dimensional deformation of sintered pieces. To accomplish this task are used very specific machining conditions to avoid the introduction of defects. An alternative is machining the compacted piece, called green ceramic, which presents easy machining. However after sintering distortions occur due to the presence of density gradients, which are located in the outer portions of the compacted. In this paper, these gradients are removed under different allowances and evaluated the corresponding distortion of the pieces after sintering. And was also investigated the tool wear, cutting force and roughness of the green and the sintered compacted pieces. As a result, less distortion is verified in the sintered pieces with greater green allowance removal value, and the influence of tool wear on green piece roughness and on the corresponding sintered piece.

Key-words: green machining, density gradient, distortion, uniaxial pressing, ceramic.