

## **USINAGEM A VERDE VOLTADA À MELHORIA DA DISTORÇÃO E ACABAMENTO SUPERFICIAL DE CERÂMICAS SINTERIZADAS**

Gill Bukvic, gill@feb.unesp.br<sup>1</sup>  
Luiz E. A. Sanchez, sanchez@feb.unesp.br<sup>1</sup>  
Carlos A. Fortulan, cfortula@sc.usp.br<sup>2</sup>  
Arthur A. Fiocchi, arthuaf@feb.unesp.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual Paulista - Av. Eng. Luiz Edmundo C. Coube 14-01, Bauru – SP - Brazil

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo - Av. Trabalhador São-Carlense, 400, São Carlos - SP - Brazil

**Resumo:** *A usinagem de cerâmicas avançadas geralmente é feita com o objetivo de corrigir as deformações das peças após a etapa de sinterização e colocá-las dentro de suas tolerâncias dimensionais e geométricas especificadas em projeto. Para cumprir esta tarefa é utilizada, principalmente, a retificação com rebolo de diamante sob baixas taxas de remoção de material na tentativa de minimizar a geração de trincas superficiais e/ou subsuperficiais deixadas na peça. A usinagem também pode ser feita com ferramenta de diamante de ponta única, mas esbarra em condições limites de remoção de material bastante estreitas que se ultrapassadas mudam o regime de remoção de dúctil para frágil. Outra alternativa é a usinagem da peça ainda compactada, chamada em verde, a qual apresenta fácil usinagem sem a introdução de defeitos prejudiciais à resistência mecânica. No entanto, depois da sinterização invariavelmente ocorrem distorções devido à distribuição heterogênea de gradientes de densidade ao longo do compactado, mas que diminuem progressivamente da periferia para o centro da peça. Sabendo-se que a maior concentração de gradientes de densidade localiza-se nas porções mais externas do compactado, neste trabalho são removidos diferentes valores de sobrematerial e avaliada a correspondente distorção da peça após a sinterização. Para isso, utilizam-se corpos-de-prova em alumina, com 99,9% de pureza, do qual são removidos sobremateriais de 0,25, 0,5, 0,75 e 1,0 mm com uma ferramenta de metal duro sob condições constantes de usinagem, cujos valores foram eleitos a partir de ensaios preliminares. Além da distorção, outras variáveis de saída foram analisadas, como desgaste de ferramenta, força de corte e rugosidade do compactado em verde e sinterizado. Como resultado, de maneira geral, verifica-se a menor distorção da peça sinterizada com o maior valor de remoção de sobrematerial em verde, a influência do desgaste da ferramenta na rugosidade da peça sinterizada e a influência da rugosidade da peça em verde na correspondente peça sinterizada.*

**Palavras chave:** *usinagem a verde, gradiente de densidade, distorção, prensagem uniaxial, cerâmica*

### **1. INTRODUÇÃO**

Embora as cerâmicas avançadas tenham várias propriedades positivas, como alta resistência ao desgaste e temperatura, estabilidade química e baixa densidade, estes materiais também apresentam características negativas que limitam a sua aplicação, especialmente a baixa tenacidade à fratura, responsável pela baixa resistência ao impacto e reduzida deformação plástica (Argawal and Rao, 2008).

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. 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). Como resultado da usinagem de peças de cerâmicas policristalinas sinterizadas, verifica-se diferentes tipos de defeitos em consequência de três mecanismos distintos de remoção de material: fratura intergranular e deslocamentos, de grãos; microfratura e formação de fragmentos de grão através de trincas intragranulares; e remoção de grandes porções de grãos, por meio de lascamentos devido à propagação de trincas transgranulares (Xu et al., 1995; Swain, 1979).

Dependendo de condições altamente controladas de usinagem pode-se minimizar os mecanismos de remoção frágil, que envolvem a formação de trincas, ou mesmo alcançar a usinagem dúctil, na qual estão presentes mecanismos de remoção por deformação plástica como nos metais. Estes dois modos de remoção de material, dúctil ou frágil, estão

associados com uma profundidade de corte crítica que, se excedida, pode resultar em defeitos (Zhong, 2003; Ajjarapu et al., 2004; Bhattacharya et al., 2006). Para diminuí-los, muitos autores, como Blackley e Scattergood (1991, 1994), Malkin e Ritter (1989) e Marshal et al, (1983), recomendam o uso de taxas de remoção de material muito mais baixas do que aquelas praticadas no acabamento de peças metálicas. Mesmo assim, este procedimento não garante que as peças cerâmicas estarão isentas de microtrincas.

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).

Para se ter uma idéia dos custos envolvidos na usinagem de peças cerâmicas, Westerheide et al (1996) apontam que do valor total de uma válvula de nitreto de silício, 44% representam o custo da usinagem, enquanto 23% o custo do pó e 6% a conformação. Os autores apontam tanto a usinagem em verde quanto o reaproveitamento do pó como medidas para redução dos custos de fabricação de peças cerâmicas. Juntamente com a usinagem em verde, também se procura aproximar as dimensões da peça sinterizada das dimensões finais, especificadas em projeto, por meio de um maior controle dimensional da peça compactada, descontando a contração linear verificada na etapa de sinterização. Este controle da dimensão da peça em verde para aproximação das medidas finais é conhecido por “near-net-shape” e pode ser feito com sucesso por meio da usinagem.

Dentre as técnicas de obtenção do compactado em verde, a prensagem uniaxial é a mais difundida devido, principalmente, ao seu baixo custo e simplicidade quando aplicada, preferencialmente, em peças com pequeno número de seções diferentes. Com a prensagem do pó, sabe-se que ocorre intenso atrito entre as partículas adjacentes e mais intensos, ainda, delas com a parede do molde. Como resultado, tem-se um preenchimento heterogêneo do pó na cavidade do molde, obtendo-se uma peça compactada com vários gradientes de densidade (Albaro, 2001; Richerson, 1992). A existência de gradientes de densidade faz com que a sinterização em cada correspondente região sofra contração volumétrica de diferente intensidade e, conseqüentemente, com valores de contrações diferentes levando à deformação da peça sinterizada (Bencoe et al., 2008).

No trabalho de Westerheide et al. (1996), o foco principal é a qualidade de peças obtidas com pó reaproveitado da usinagem em verde. No entanto, eles também fazem 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 que 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 altos na porção superior da peça do que na inferior onde é comum se observar avarias.

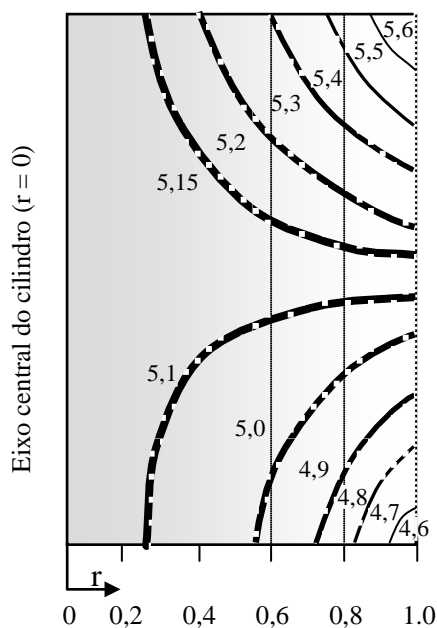


Figura 1. Gradiente de densidade em peça prensada uniaxialmente.

Além da possibilidade da usinagem em verde servir para produzir formas complexas na peça, minimizar suas distorções e aproximar a medida da peça sinterizada de sua medida final, Maier e Michaeli (1997) observaram clara

relação entre a qualidade superficial da peça em verde usinada e a sua resistência mecânica depois de sinterizada. De maneira parecida com a usinagem de peças cerâmicas sinterizadas o mecanismo de remoção na usinagem em verde guardam estreita semelhança. Nos dois casos, a usinagem sob condições severas é caracterizada por lascamentos com remoção de numerosos grãos juntos, invariavelmente acompanhado de microtrincas na superfície da peça, enquanto a usinagem sob condições brandas é isenta de defeitos e sobre a superfície gerada são deixadas marcas inequívocas da ponta da ferramenta. A estes dois mecanismos, Maier e Michaeli (1997) denominaram modo de lascamento e modo de corte, respectivamente. Em seus ensaios, os autores encontraram influência do acabamento superficial das peças usinadas em verde, sob os dois modos diferentes de remoção, na resistência à flexão das correspondentes peças sinterizadas. De modo geral, constatou-se que: o aumento da velocidade de corte produz leve diminuição da rugosidade e a força de corte permanece praticamente constante; o aumento do avanço produz aumento de ambos, rugosidade e força de corte; e o aumento da profundidade de usinagem causa leve diminuição da rugosidade, mas aumento expressivo da força de corte.

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. Outro problema comumente apontado são as precauções necessárias para se adotar na proteção da máquina ferramenta em virtude do material removido se dar em forma de poeira e por isso penetrar facilmente nos componentes vitais da máquina, como guias e rolamentos, fazendo com que o desgaste destas partes se dê de forma acelerada.

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 consequência, 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 no qual as peças sinterizadas podem ser usadas sem a necessidade de usinagem.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os corpos-de-prova são feitos em alumina com 99,9% de pureza, com forma cilíndrica com dimensões aproximadas de  $\varnothing 15 \times 19$  mm, conformados por prensagem uniaxial de simples ação sob pressão de 120 MPa. Eles foram usinados em uma fresadora universal, mas a operação feita foi a de torneamento com a peça presa no cabeçote vertical, que proporciona o movimento de rotação, e a ferramenta fixada num dispositivo preso sobre a mesa da máquina, que executa o movimento vertical de avanço sobre a peça e horizontal, que produz movimento radial para profundidade de usinagem. A opção pelo uso de uma fresadora é devido à robustez da máquina, facilidade de acesso em torno da peça com espaço disponível para fixação de dispositivo e instrumentos e também pela mesa ter baixa velocidade de movimento o que disponibiliza avanços bastante pequenos, menores do que num torno convencional, caso necessário.

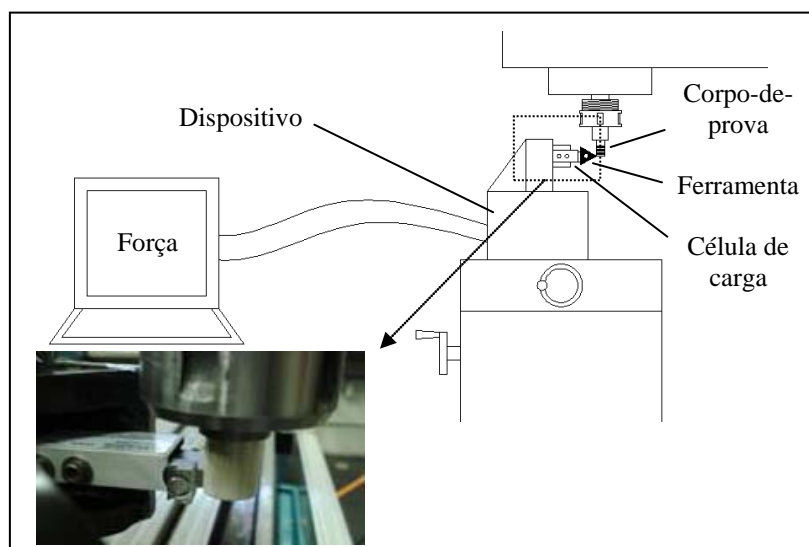


Figura 2. Montagem esquemática do banco de ensaio de usinagem

O dispositivo, preso à mesa da máquina, foi especialmente construído para o trabalho, tendo a capacidade de fixação de um porta ferramenta preso a uma célula de carga marca R&S, modelo MB, fundo de escala de 20 kgf, conforme pode ser visto na Figura 2, tendo como frequência de aquisição 100 pontos/min.

A ferramenta de corte usada para torneiar as amostras é de metal duro sem revestimento e sem quebra-cavacos da Kyocera, designação TPGB 1102005, 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; 0,5 mm; 0,75 mm; e 1,0 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 3 são mostrados três exemplos de superfícies usinadas, uma sob condições de corte não apropriadas (figura 3a), outra parcialmente apropriada (figura 3b), e a última sob condição adequada e por isso usada nos ensaios (figura 3c). As imagens das superfícies foram obtidas por meio de um microscópio óptico acoplado a uma câmara digital de alta resolução. Estes mesmos equipamentos também foram usados na visualização e medição do desgaste da ferramenta de corte.

Devido à baixa resistência mecânica do compactado cerâmico em verde, uma cavidade cilíndrica do tamanho aproximado do diâmetro da peça foi confeccionada em aço e nela colado o corpo-de-prova, com auxílio de um adesivo à base de cera. Depois de colado, o conjunto formado pela base e corpo-de-prova pôde ser firmemente fixado na pinça da fresadora para a realização da usinagem. Para descolar o corpo-de-prova foi usado calor para o derretimento da cera.

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 (Ra) 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.



**Figura 3. Superfícies de corpos-de-prova usinados em verde com acabamento considerado inadequado (a), parcialmente adequado (b) e adequado (c).**

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 escolhida entre cada posição ao longo da geratriz dos corpos-de-prova em verde foi de 1,5 mm e 1,235 mm nos corpos-de-prova sinterizados, uma vez que o valor da contração linear média encontrado foi de 17,63% e essa relação foi levada em consideração. O esquema ilustrativo deste procedimento está representado na Figura 4, feito tanto para medição da contração do corpo-de-prova sem usinagem quanto usinado.

Levando em consideração que a técnica usada na compactação dos corpos-de-prova produz dois lados com diferentes densidades, a fixação para usinagem foi feita sempre do lado mais denso onde a resistência mecânica é mais alta e a distorção menor (Richerson, 1992; Westerheide et al., 1996 e Bencoe, 2008).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 mostra os gráficos com os valores dos diâmetros médio dos corpos-de-prova medidos ao longo de cinco posições. A Figura 5(a) refere-se à peça compactada, em verde, enquanto a Figura 5(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 5(c), no qual nota-se que a maior contração ocorreu na seção 5 onde, segundo diversos autores (Bencoe, 2008; Albaro, 2001; Maier & Michaeli, 1996 e Westerheide et al, 1996), está localizada a região com menor densidade aparente numa peça como esta, obtida por compactação uniaxial. 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, devido à maior interação prévia entre os grãos de alumina no compactado em verde.

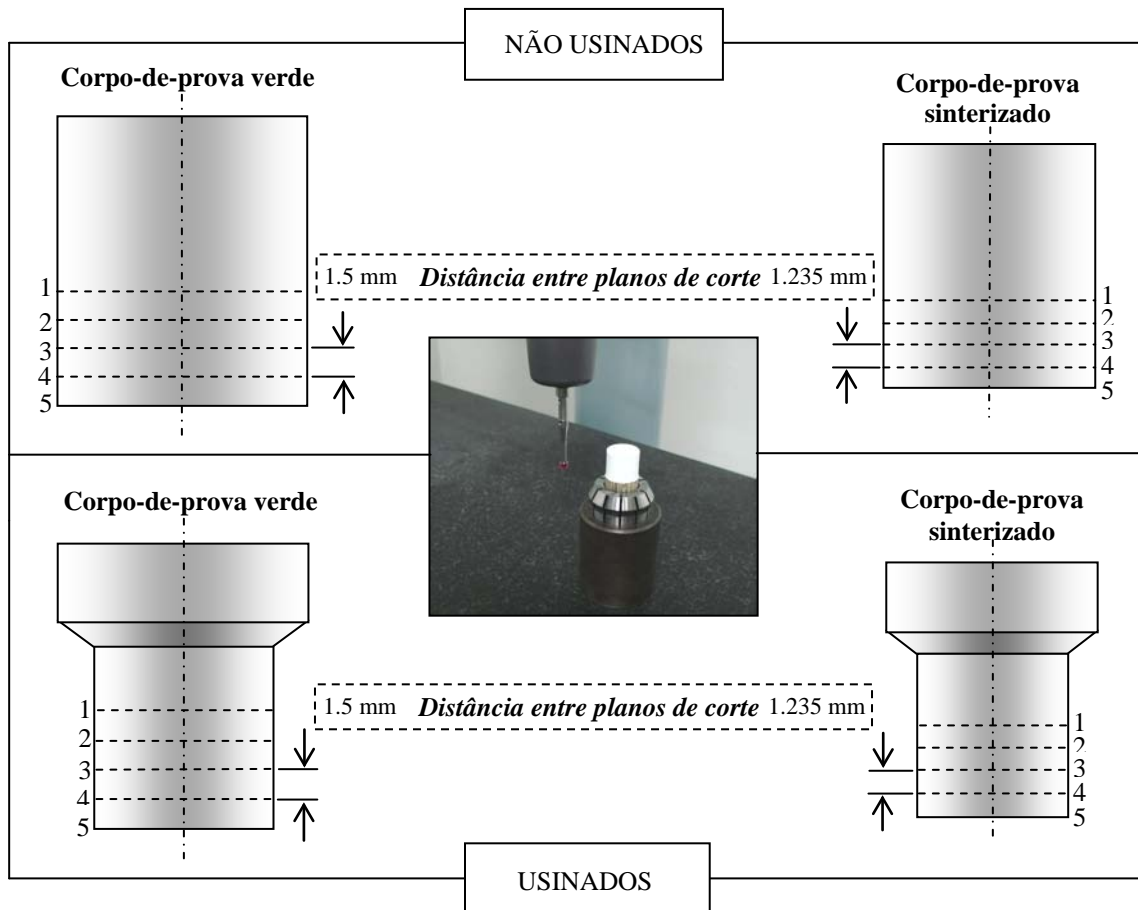


Figure 4. Locais medidos nos corpos-de-prova em verde e sinterizados sem usinagem e com usinagem.

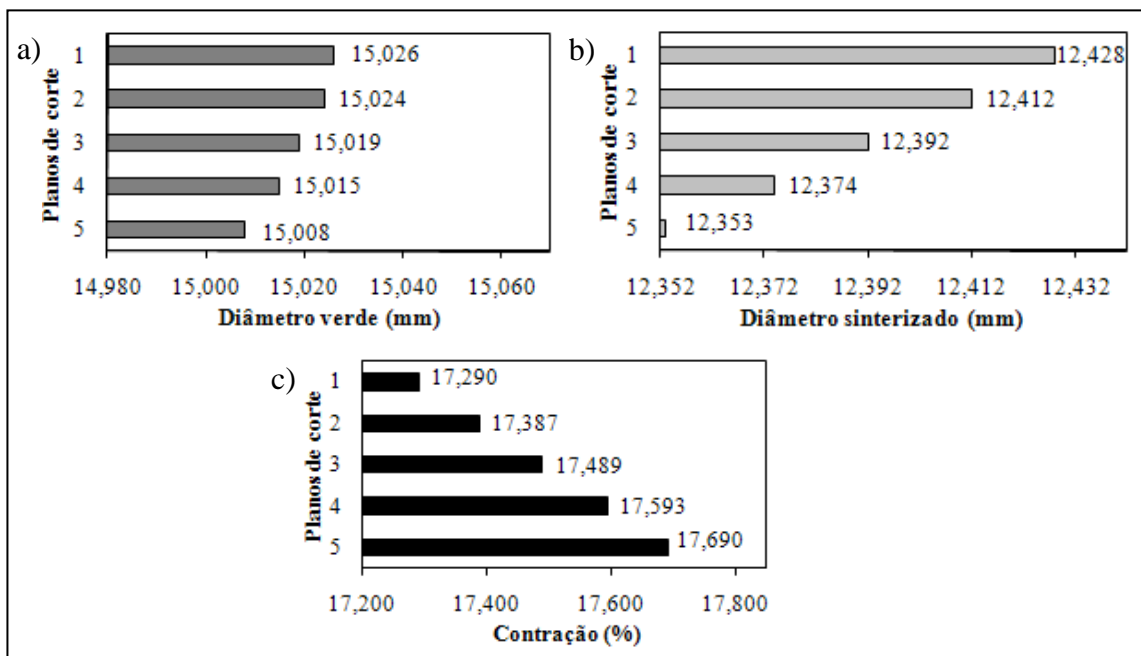


Figura 5. Contração linear média dos corpos-de-prova não usinados em verde e sinterizado.

Os gráficos das Figuras 6 e 7 mostram a contração linear média 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 1,0 mm, respectivamente. 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.

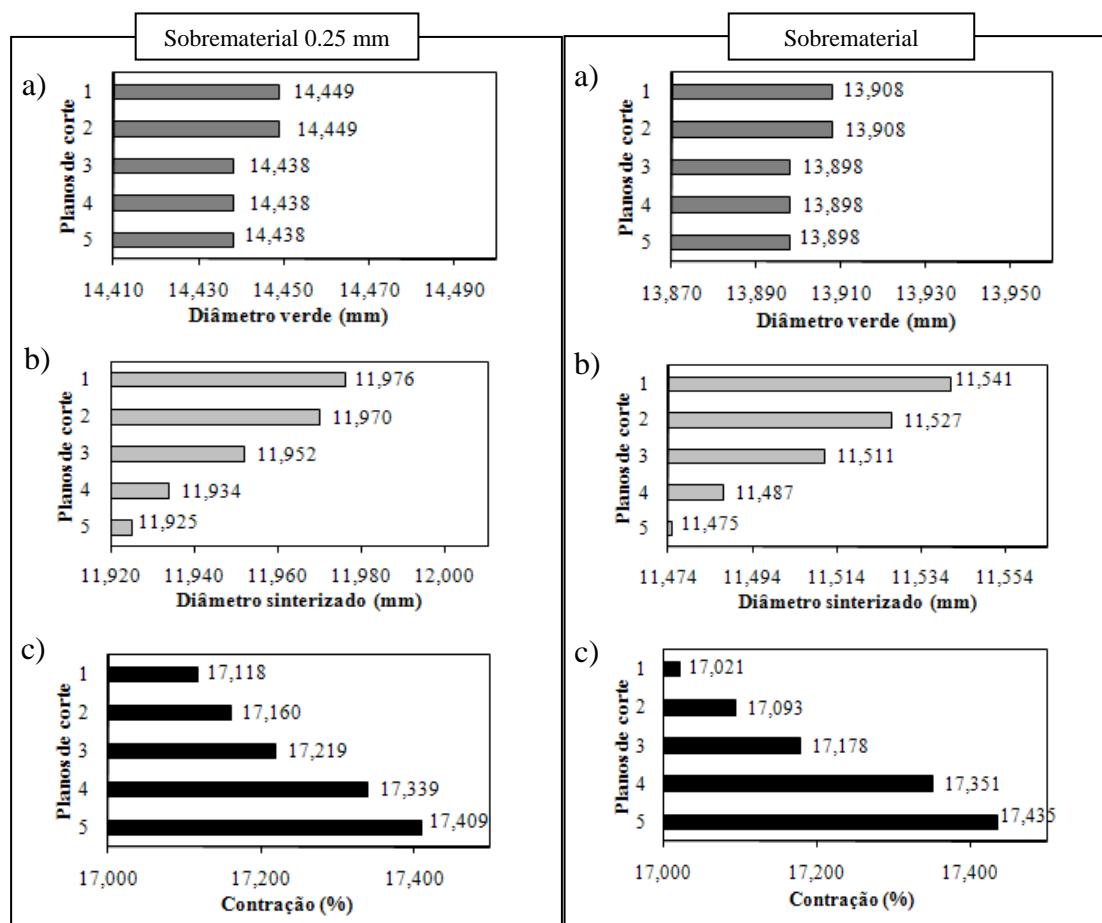


Figura 6. Contração linear média para corpos-de-prova usinados em verde e sinterizado.

A partir dos gráficos dos resultados mostrados até aqui, pode-se inferir que, se além do sobrematerial radial também fosse removido um sobrematerial longitudinal, a distorção da peça sinterizada poderia diminuir ainda mais. Supondo o descarte das duas maiores contrações, que pertencem às duas posições mais externas da peça, (4 e 5) na Figura 4, dentro de um hipotético sobrematerial de 3 mm, a distorção calculada nos gráficos b das Figuras 7 diminuiriam como a tabela 1 sugere. Portanto, para a máxima minimização da distorção em peças cerâmicas sinterizadas, a remoção em volta de toda a peça parece desempenhar importante papel.

Tabela 1. Redução da distorção com a exclusão dos locais mais extremos da peça em verde.

		Considerando 5 locais	Exclusão dos 2 locais mais externos	Redução da distorção (%)
Sobrematerial	0,25	0,041	0,024	42
	0,5	0,056	0,030	46
	0,75	0,060	0,029	52
	1,0	0,022	0,015	32

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 1,0 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 para o sobrematerial de 0,5 e 0,75 mm obteve-se 0,066 e 0,071 mm de distorção, respectivamente. O fato de a destacada menor distorção ter sido conseguida com a remoção do maior sobrematerial de 1,0 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.

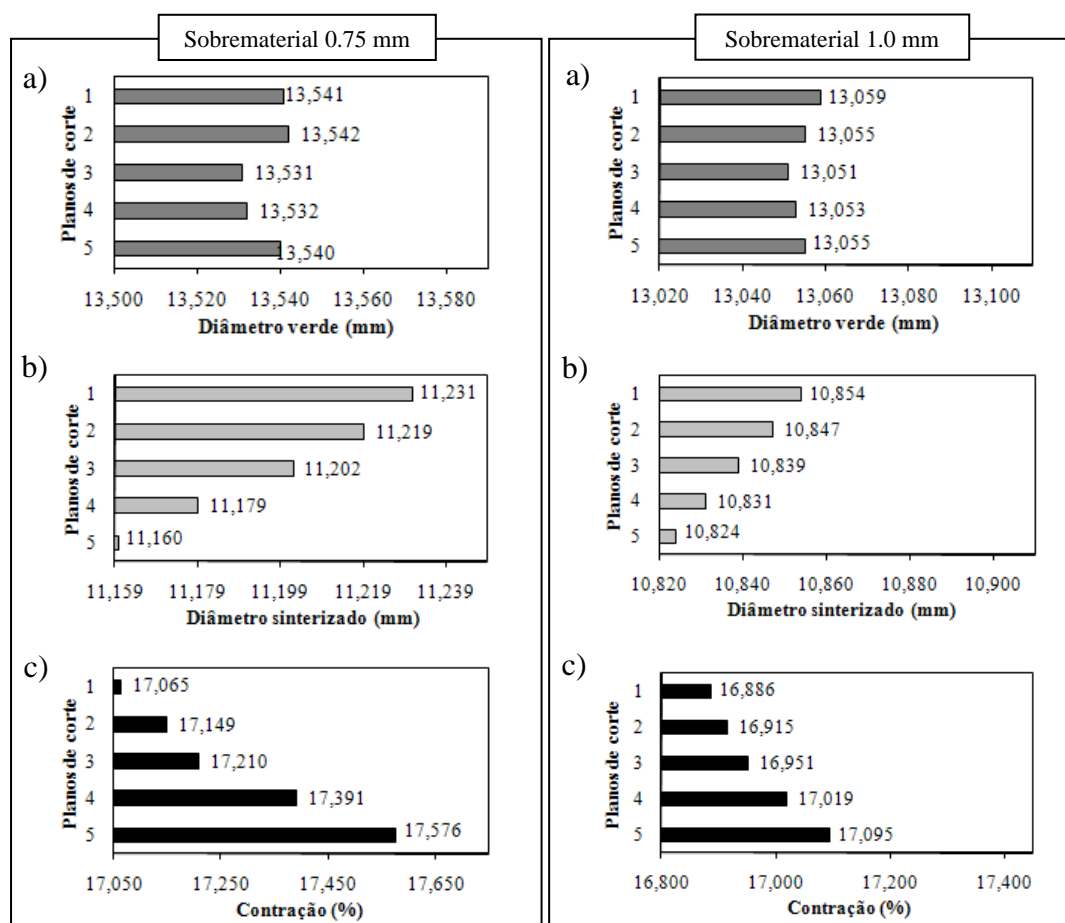


Figura 7. Contração linear média para corpos-de-prova usinados em verde e sinterizado.

No gráfico da Figura 8 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. Na condição de sobrematerial de 1,0 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.

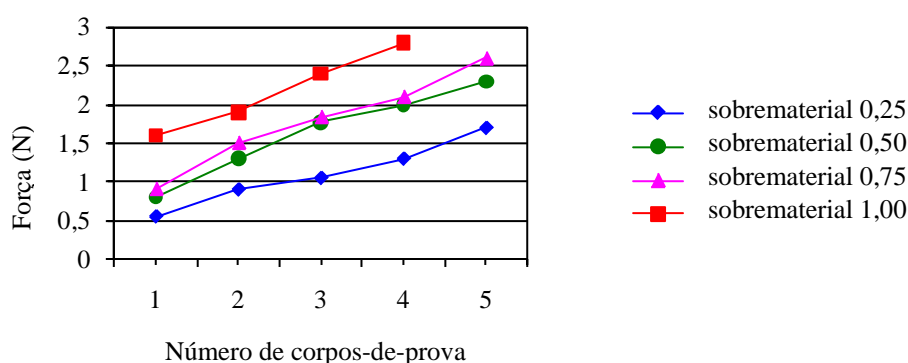
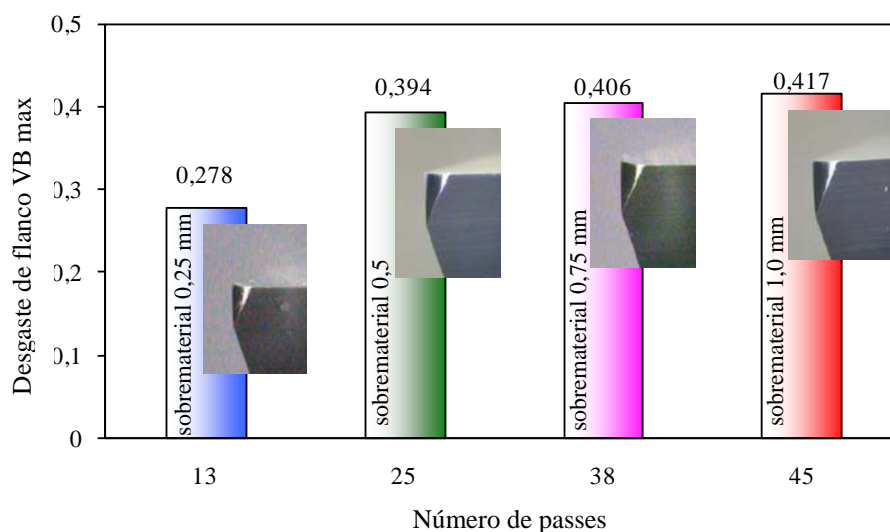


Figure 8. Força de corte para diferentes sobremateriais.

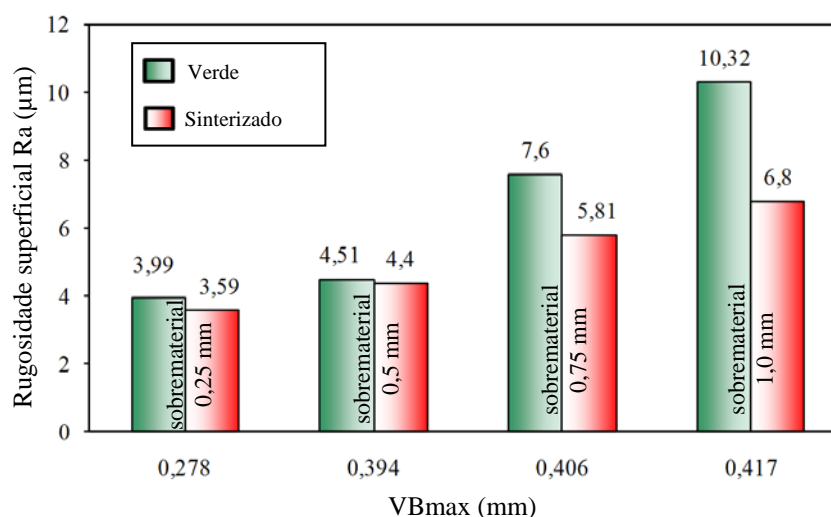
Da mesma maneira que os metais, a força de corte na usinagem da alumina em verde também se mostra bastante suscetível ao desgaste da ferramenta de corte. Mesmo com baixa taxa de desgaste a força de corte é claramente crescente como, por exemplo, se constata no caso da remoção do sobrematerial de 0,25 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 1.0, 0.75, 0.5 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 1.6, 0.9, 0.8 e 0.55 N, respectivamente.

Na Figura 9 é apresentado o valor do desgaste de flanco máximo (VBmax) com o correspondente número de passes de usinagem necessários para a remoção do material total dos corpos-de-prova de cada condição. Ao longo de todo o ensaio verificou-se, pelas imagens microscópicas, que o desgaste da ferramenta de corte foi causado pela natureza abrasiva dos grãos de alumina da peça. A ausência de qualquer avaria ou adesão de material sobre a ferramenta pode ser atribuída a baixa temperatura e força de corte envolvidos na usinagem de compactados em verde.



**Figure 9. Desgaste da ferramenta versus número de passes executados em cada sobrematerial.**

Verifica-se ao longo dos ensaios que a rugosidade dos corpos-de-prova usinados acompanha o desgaste da ferramenta de corte. Conforme se pode observar no gráfico da Figura 10, os valores de rugosidade foram crescentes com o aumento do desgaste de flanco (VBmax). É observado que em todos os sobremateriais, a rugosidade diminuiu após a sinterização e o melhor acabamento superficial obtido nos corpos-de-prova sinterizados foi com o correspondente melhor acabamento superficial em verde.



**Figure 10. Rugosidade dos corpos-de-prova em verde e depois de sinterizado ao final da remoção de cada sobrematerial.**

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 usado, a redução média da rugosidade foi de 10% para 0,25 mm, 3% para 0,5 mm, 23% para 0,75 mm e 34% para 1,0 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.



Na Figura 11 é apresentado o aspecto da superfície ao final da usinagem em verde e após a sua sinterização. Nestas imagens pode-se observar que as características da superfície dos corpos-de-prova em verde e sinterizado são basicamente preservadas. As regiões que parecem ter sido formadas por deslocamentos de porções de grãos lembram um dos possíveis mecanismos de remoção presente na usinagem de cerâmicas sinterizadas.

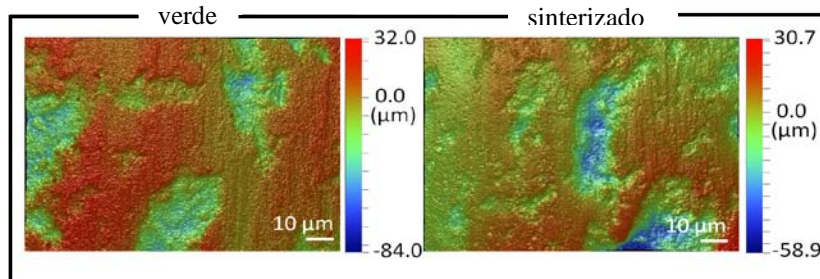


Figura 11. Aspecto da superfície do corpo-de-prova usinado em verde e sinterizado.

#### 4. 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 1.0 mm diminuiu significativamente após a sinterização
- Além da remoção de sobrematerial radial, a retirada de material na direção longitudinal do compactado também deve contribuir com a minimização da distorção da peça sinterizada;
- O acabamento superficial da peça em verde tem influência direta na peça sinterizada, sendo que a usinagem do compactado em verde é sempre benéfica na redução da rugosidade da peça sinterizada;
- Com a substancial redução das distorções de peças sinterizadas, graças à usinagem em verde, o uso de peças sinterizadas sem necessidade de usinagem final se torna plausível em aplicações no qual a especificação técnica permite. Neste caso, a rugosidade da peça em verde passa a ter importância ainda maior;
- 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, 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, conforme os trabalhos citados no texto, mas também para reduzir suas distorções e melhorar a rugosidade, como foi observado neste trabalho.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Argawal, A. and Rao, P.V., 2008, "Experimental investigation of surface/subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol 48, pp. 698-710.
- Strakna, T.J, Jahanmir, S., Allor, R.L., and Kumar K.V., 1996, "Influence of grinding direction on fracture strength of silicon nitride", *J. Eng. Mater.Tech.*, Vol. 118, pp. 335-342.
- Mayer, J.E. and Fang, G.P., 1995, "Effect of grinding parameters on strength and finishing of ceramics", In *Proceedings 1<sup>st</sup> International Machining and Grinding Conference-SME*, September, pp. 151 - 164.
- Xu, H.H.K. and Jahanmir, S. ,1995, "Microfracture and material removal in scratching of alumina", *J. Mat. Sci.*, Vol. 30, pp. 2235-2247.
- Swain, M.V., 1979, "Microfracture about scratches in brittle solids", *Proc. R. Soc. London*, 1979, A 366, 575-597.
- Zhong, Z.W., 2003, "Ductile or Partial Ductile Mode Machining of Brittle Materials", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 21, pp. 579-585.
- Ajjarupu, S.K., Fesperman, R.R., Patten, J.A. and Cherukuri, H.P., 2004, "Experimental and Numerical Investigation of Ductile Regime Machining of Silicon Nitride", Center for Precision Metrology, Department of Mechanical Engineering and Engineering Science, The University of North Carolina at Charlotte, Charlotte, NC 28223-0001, USA.
- Bhattacharya, B., Patten, J.A. and Jacob, J., 2006, "Single Point Diamond Turning of CVD coated Silicon Carbide", 2006 ASME International Conference on Manufacturing Science and Engineering October 8-11, 2006, Ypsilanti, Michigan.
- Blackley, W.S. and Scattergood, R.O., 1991, "Ductile Regime Machining Model for Diamond Turning of Brittle Materials," *Precis. Eng.*, Vol. 13, pp. 95-103.
- Blacley, W.S. and Scattergood, R.O., 1994, "Chip Topography for Ductile-regime Machining of Germanium," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 116, pp. 263-266.

- Malkin, S. and Ritter, J.E., 1989, "Grinding Mechanisms and Strength Degradation for Ceramics." *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, pp. 67-174.
- Marshall, D.B., Evans, A.G., Khuri Yakub, B.T., Tien, J.W. and Kino, G.S., 1983, "The Nature of Machining Damage in Brittle Materials," *Proc. R. Soc. London*, Vol. 385, pp. 461-475.
- SU, B., DHARA, S. and WANG, L., 2008, "Green ceramic machining: A top-down approach for the rapid fabrication of complex-shaped ceramics". In. *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 28, pp. 2109-2115.
- Ekabaram, V., 2008, "Optimization of Green Ceramic Grinding", Thesis. The University of Toledo, OH.
- Westerheide, R., Driisdau, K.A., Hollstein, T., Schwickert, T. and Zipse, H., 1996, "Advances in Characterisation of Machined Green Compacts", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 17, pp. 467-472.
- Albaro, J.L.A., 2001, "A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial. Parte V: Descrição da Etapa de Prensagem.", *Cerâmica Industrial*.
- Richerson, D.W., 1992, "Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and use in design," 2<sup>nd</sup> edition, Marcel Dekker, Inc. USA.
- Bencoe, D.N., DiAntonio, C.B., and Ewsuk K.G., 2008, "Density gradient evolution in alumina powder compacts during sintering", Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185-1349.
- Maier, H.R., and Michaeli, N., 1997 "Green Machining of Alumina," *Key Engineering Materials*, Vols. 132-136, pp. 436-439.
- Desfontaines, M., Jorand, Y., Gonon, M. and Fantozzi, G., 2004, "Characterisation of the green machinability of AlN powder compacts", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 25, pp. 781-791.
- Ng, S.H., Hull, J.B. and Henshall, J.L., 2006, "Machining of novel alumina/cyanoacrylate green ceramic compacts", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 175, pp. 299-305.

## 6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# GREEN MACHINING FOCUSED TO IMPROVEMENT THE DISTORTION AND SURFACE FINISH OF SINTERED CERAMICS

Gill Bukvic, [gill@feb.unesp.br](mailto:gill@feb.unesp.br)<sup>1</sup>  
Luiz E. A. Sanchez, [sanchez@feb.unesp.br](mailto:sanchez@feb.unesp.br)<sup>1</sup>  
Carlos A. Fortulan, [cfortula@sc.usp.br](mailto:cfortula@sc.usp.br)<sup>2</sup>  
Arthur A. Fiochi, [arthuaf@feb.unesp.br](mailto:arthuaf@feb.unesp.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual Paulista - Av. Eng. Luiz Edmundo C. Coube 14-01, Bauru – SP - Brazil

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo - Av. Trabalhador São-carlense, 400, São Carlos - SP - Brazil

**Abstract:** *Advanced ceramics machining is generally done with the objective of correcting distortions in pieces after sintering and putting them within dimensional and geometric tolerances specified in the project. However the machining invariably produces surface and/or subsurface damages on the piece. An alternative is machining the still compact piece, called green ceramic, which presents easy machining without the introduction of harmful defects to mechanical resistance/strength. After sintering there are commonly distortions caused by the heterogeneous distribution of density gradients along the compacted area, but that progressively diminish from the outlying area towards the center of the piece. Since the greatest concentration of density gradients is located in the most outlying portions of the compacted, in this study different allowance values are removed and the corresponding distortion after sintering is assessed. Besides distortion, other output variables were analyzed, such as tool wear, cutting strength and surface roughness of the green ceramics and the sintered. In general, as a result, less distortion is verified in the sintered piece with greater green allowance removal value.*

**Keywords:** *green machining, density gradient, distortion, uniaxial pressing, ceramic*

## RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.