

ESTRATÉGIA DE USINAGEM A VERDE DIRIGIDA AO PROJETO DE CORPOS CERÂMICOS

G, Bukvic⁽¹⁾; A.A. Fiocchi⁽¹⁾; L.E.A. Sanchez⁽²⁾; B.M. Purquerio⁽¹⁾; C. A. Fortulan⁽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

Este trabalho trata de estratégias de usinagem a verde aplicada ao projeto e manufatura de produtos cerâmicos, incluindo seleção do processo, parâmetros de corte e ferramentas. A usinagem à verde é uma técnica estruturada na filosofia do “near net shape”, que aplicada na fabricação de peças cerâmicas, torna possível a obtenção de peças complexas em sua maior resistência estrutural, para isso, a introdução de defeitos deve ser minimizada e a de defeitos críticos eliminada. Na busca por uma peça em formato de barra, foi selecionada para o processo de usinagem a ferramenta cilíndrica de ponta plana. As barras usinadas foram sinterizadas e analisadas quanto à influência do ligante, do material abrasivo da ferramenta e quanto aos parâmetros de corte. Foram avaliados metrologicamente e por resistência mecânica sinterizada. Foi encontrado as melhores condições nos corpos processados com ligante PVB usinados com ferramentas de abrasivos de CBN com velocidade de corte de 100mm/min, alcançando 190 MPa de resistência à fratura. O banco de dados gerado permite o planejamento de tomada de decisões no projeto e manufatura de corpos com formatos genéricos e complexos.

Palavras-chave: estratégia de usinagem, projeto, manufatura, cerâmica, usinagem a verde.

INTRODUÇÃO

A usinagem a verde é uma técnica estruturada na filosofia do “near net shape”, sendo empregada em produtos conformados para conferir formas simétricas agregando recursos aos métodos de conformação que sozinhos não são capazes de produzir geometrias intrincadas de compactados cerâmicos⁽¹⁾. Esta operação é de baixo consumo energético, de grande capacidade de remoção de material e capaz de produzir superfícies complexas e não exige ferramentas extremamente duras, isto devido a baixa resistência mecânica apresentada pelo estado verde do material⁽²⁾.

Nos últimos anos, observou-se um aumento constante na necessidade de protótipos de cerâmica em desenvolvimentos de sistemas técnicos. No entanto, devido às dificuldades de dar forma a cerâmica e a longos prazos de entrega, muitas vezes dificultaram a evolução rápida do sistema. A fim de encurtar os ciclos de desenvolvimento, a usinagem de componentes de cerâmica no estado verde ou o pré-sinterizados pode ser realizada⁽³⁾.

No caso das cerâmicas aplicadas em pontes dentárias, todas são de forma livre complexas requerendo uma alta precisão dimensional⁽³⁾. E com o rápido advento da tecnologia do controle numérico computadorizado (CNC) auxiliando na usinagem, é possível obter uma aproximação “*top-down*” de um material cerâmico verde, sendo usinado em um formato complexo desejado e de uma forma rápida⁽⁴⁾.

Próteses de componentes bio-cerâmicos estão se tornando totalmente confiáveis e contribuindo para altos níveis do bem estar humano. Do ponto de vista da manufatura, por outro lado, a produção de componentes bio-cerâmicos ainda depende de operações que requerem intensa mão de obra, a exemplo da usinagem a verde e a sinterização dos componentes. Tecnologias de manufatura ainda não estão desenvolvidas para a produção em massa de produtos cerâmicos. Requisitos de garantia de qualidade para um controle preciso da microestrutura da cerâmica são comprometidos pelos fatos de que: i) o material de partida do pó cerâmico, caracterizado por alta pureza e fineza, muitas vezes aglomera durante os processos de produção (por exemplo, secagem e granulação); ii) os defeitos que ocorrem durante a sinterização final pode iniciar mais tarde uma falha do produto⁽⁵⁾.

SCHELLER 1996 afirma que pesquisas na área de usinagem a verde de cerâmicas são extremamente limitadas. Embora extensivamente aplicada na indústria pouco se relate a respeito da otimização do processo, seleção de rebolos abrasivos e defeitos críticos introduzidos durante a usinagem.

Um requisito comum e básico de peças cerâmicas é a fabricação dentro das dimensões especificadas, incluindo as tolerâncias⁽⁷⁾, e assim como as peças metálicas, pode-se utilizar a usinagem para alcançar tais dimensões. Mas para as cerâmicas, o processo de usinagem pode estar presente nas diferentes etapas de fabricação após a sinterização (ou queima), após a sua queima parcial (*white machining*) e em verde (*green machining*).

A usinagem a verde oferece uma série de vantagens comparada com outras tecnologias atualmente utilizadas na fabricação “*net shape*” de cerâmicas em termos

de eficácia de custo e acabamento superficial. Mas a chave para o sucesso da sua aplicação inclui o adequado processamento da cerâmica para a usinagem a verde e o controle da distorção na sinterização⁽⁴⁾.

A fragilidade das peças compactadas em verde é um problema, uma vez que traz dificuldades durante a usinagem⁽⁸⁾, como a geração de rugosidade alta, bordas fraturadas e partes quebradas na região de fixação da peça e, como agravante, ainda que não se observe defeitos aparentes na peça em verde eles podem se revelar após sinterização. Em geral, uma alta densidade da peça verde também é tradicionalmente associada com maior resistência do compactado, sendo um pré-requisito para a usinagem de peças nesse estado⁽⁹⁾. Segundo BESSHIA, SATOB e TSUTSUIB (1999) a fragilidade em verde é um dos limitantes para aplicação da técnica de usinagem inibindo sua prática, trazendo como consequência poucos trabalhos na área.

Estudos mostram a influência da pressão de compactação na qualidade da usinagem à verde, com o aumento da pressão de compactação o mecanismo de remoção de material atravessa as fases de fratura, inicialmente, intraglanular para uma fase mista e subsequente fase interglanular, onde se verifica maiores danos superficiais⁽¹¹⁾. Este aspecto demonstra a necessidade de estudar os efeitos das variáveis da conformação (umidade da matéria prima, pressão de compactação, tempo) em função das variáveis de remoção de material durante a usinagem.

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⁽¹²⁾.

O aglomerante pode afetar enormemente a usinabilidade das peças. Resistência e plasticidade podem ser ajustadas pelo tipo e quantidade de aglomerante. PVAL e emulsões acrílicas são fortes aglomerantes utilizados⁽¹³⁾. A mesma aplicação como aglomerante é dada ao PVB, sendo esse um agente de alta adesividade, permitindo a elaboração de compósitos de alta resistência ao impacto a baixa temperatura⁽¹⁴⁾.

Os avanços nos aglomerantes/lubrificantes e em tecnologia de compactação levaram ao desenvolvimento de peças com alta resistência, de modo que permitem à usinagem a verde característica de alta qualidade, possibilitando a confecção de

furos e sulcos, especialmente quando se usa a compactação a quente associada aos novos aglomerantes^(6,9).

Importância deve ser dada, também, aos tipos de materiais empregados nas ferramentas, sendo o CBN e o diamante exemplos de matérias que podem ser utilizados na fabricação de ferramentas para a usinagem a verde. O CBN em relação ao diamante possui uma dureza abaixo deste, porém, seus grãos possuem uma rugosidade mais pronunciada e de maior fator crítico que o diamante, que levou a uma influência na performance de rebolos de retificação. Possui, também, uma morfologia angular de maior aspereza que promove uma melhor ancoragem mecânica nas ferramentas onde é aplicado⁽¹⁵⁾.

O objetivo desse trabalho tratou da usinagem a verde aplicada ao projeto de produtos cerâmicos. Ênfase foi dada à sua morfologia e propriedades requeridas para um determinado produto. Inclui estratégias de usinagem para a seleção da melhor opção de processo. Inclui elaboração de estratégia de usinagem direcionada na seleção dos parâmetros de corte visando produção econômica sem a introdução de defeitos críticos, inclui a seleção de tipos e perfis das ferramentas de corte. Este trabalho compõe experimentos de retificação frontal/tangencial e suas implicações.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foi elaborada uma metodologia para o estudo da usinagem à verde de corpos de alta alumina com diferentes ligantes. Barras retangulares foram usinadas a verde, à partir de um bloco conformado, sob diferentes condições de corte e com diferentes ferramentas. As barras foram sinterizadas e submetidas ao ensaio de ruptura à flexão e tiveram as suas superfícies usinadas analisadas pela rugosidade.

MATÉRIA PRIMA E MANUFATURA

A alumina foi selecionada devido a sua alta dureza e propriedades tidas como universais onde os resultados obtidos podem ser exportados aos outros materiais cerâmicos. Foi empregada a Alumina Calcinada A1000-SG, (Almatis, Inc.) com diâmetro médio equivalente de partícula de 0,4 μm , área superficial de 7,7 m^2/g , ρ_{real} : 3,99 g/cm^3 . Como ligante foi utilizado o PVAL (2 % em peso) juntamente com o poliacrilato de amônia (dispersal 130) (1 % em peso) em meio aquoso à 68 vol% e o PVB (2 % em peso) em meio alcoólico (alcool Isopropílico) a 68 vol% os quais foram

misturados em moagem de bolas. As formulações foram denominadas de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Denominação das formulações.

Material	Ligante	Defloculante	Meio líquido
A	PVAL	Poliacrilato de Amônio	Água deslilada
B	PVB	PVB	Álcool Isopropílico

PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para a obtenção dos corpos-de-prova em formato de barras retangulares com dimensões de 40x4x6 mm (comprimento/largura/espessura) por usinagem a verde. Foram utilizados corpos no formato de blocos com dimensões de 40x40x6 mm (comprimento/largura/espessura), prensados uniaxialmente à 80 MPa seguido de prensagem isostática a 100 MPa. Os corpos foram tratados termicamente à 80° por 12 horas e aderidos com cianoacrilato na superfície de uma base de gesso por uma de suas extremidades (que não foi utilizada).

ESTRATÉGIA DE USINAGEM

Com a escolha pelo formato de barra dos corpos-de-prova do ensaio, com perfil de seção retangular, o tipo do processo de usinagem e o tipo e formato da ferramenta de corte se tornaram pontos importantes no projeto para a obtenção dos mesmos. O questionamento sobre o melhor processo a ser empregado e o melhor tipo de ferramenta orientou a busca por uma estratégia de usinagem. Sendo feita a escolha do processo e da ferramenta que melhor se aplicaria ao formato da peça pretendida.

SELEÇÃO DO PROCESSO

Para a escolha do processo de usinagem do corpo-de-prova de formato retangular, foi criada uma tabela com uma família básica de peças com os principais processos de usinagem que poderiam ser aplicados a um formato determinado, conforme mostra a Tabela 2.

Dessa forma, a partir da Tabela 2, foi determinado que o melhor processo de usinagem que se aplicaria ao corpo-de-prova de formato retangular seria o de retificação, sendo essa a frontal e a tangencial plana.

Tabela 2 – Família básica de peças.

Forma	Processo de Usinagem
Cilíndrica	Retificação
	Torneamento
Retangular	Retificação tangencial plana
	Retificação frontal
Furo	Retificação de topo
	Retificação de topo incremental
Esférica	Retificação tangencial de perfil
	Retificação tangencial de mergulho (ferramenta perfilada)
	Torneamento

SELEÇÃO DA FERRAMENTA

No processo de retificação fica restringida a utilização de ferramentas apenas de revolução. Foi feita, então, a escolha por um tipo ferramenta conhecida como ponta montada. Sendo essa fabricada com grãos abrasivos, que são fixados a uma haste cilíndrica por processo eletrolítico de deposição metálica ou mesmo por resina. Podendo ser produzida em uma grande variedade de formatos e tamanhos e utilizando grãos abrasivos de diamante e CBN de varias granulométricas. A Tabela 3 mostra alguns formatos de pontas montadas básicas que podem ser encontradas no mercado.

Tabela 3 – Pontas Montadas básicas.

Pontas Montadas	Material
Ponta esférica	Diamante CBN Alumina Eletro-fundida
Cilíndrica com ponta de face plana	
Cilíndrica com ponta em forma de calota esférica	
Cônica com ponta em forma de calota esférica	
Cônica com ponta de face plana	
Rebolos	
Rebolos e discos	

Devido ao corpo-de-prova possuir formato retangular, com faces perpendiculares e paralelas umas as outras. Foram selecionadas duas pontas montadas de formato cilíndrico com ponta de face plana utilizando, a primeira, abrasivo de diamante e, a segunda, abrasivo de CBN. As dimensões das ferramentas escolhidas para o ensaio foi de $\phi 2 \times 6$ mm com abrasivo de granulometria 80, tanto para o diamante quanto para o CBN. A descrição da ferramenta de diamante gerada pelo fabricante foi D PMD 020 D 181 e da de CBN foi B PMD 020 B 181, ambas fabricadas pela empresa Master Diamond Ferramentas Ltda.

A opção pelo diamante e o CBN se deve a característica de alta dureza apresentada por estes abrasivos, o que reflete na vida da ferramenta. O diamante, material natural mais duro encontrado na natureza, e o CBN, material artificial com sua dureza logo abaixo do diamante. Arestas “afiadas” são indispensáveis na usinagem e isto tem a ver com a natureza do grão abrasivo, ou seja, se o grão é natural, artificial ou se foi fundido e fraturado como o caso da alumina eletrofundida. Por isso, foi feita a escolha do CBN como uma segunda opção de material para a ferramenta, além de seus grãos apresentarem uma maior rugosidade que os grãos de diamante, o que poderia gerar outra resposta na usinagem dos corpos-de-prova.

PLANEJAMENTO E ENSAIOS DE CORTE

Os experimentos de corte seguiram o planejamento apresentado na Tabela 4. Foi empregada uma fresadora CNC equipada com *spindle* rolamentado de precisão com rotação de 55.000 rpm, que gerou velocidade periférica da ferramenta de 15 m/s. O planejamento do corte e a execução do mesmo é mostra na Figura 1.

Tabela 4 – Planejamento experimental.

Ensaio	Formulação	Ferramenta	Profundidade de corte (ap) (mm)	Velocidade de avanço (f) (mm/min)
AD5-100	A	Diamante	0,5	100
AD5-50			0,5	50
BD5-100	B	Diamante	0,5	100
BD5-50			0,5	50
BB5-100	B	CBN	0,5	100
BB5-50			0,5	50

RESISTÊNCIA MECÂNICA

Os corpos-de-prova foram analisados quanto a resistência à ruptura por flexão a quatro pontos, segundo norma ASTM C1161-02c. Sendo suas dimensões aproximadas após a sinterização de 33x4,65x3,4 mm (comprimento/largura/espessura). Utilizando a Máquina Universal de Ensaio da EMIC® com velocidade do travessão em 0,5 mm/min com célula de carga de 2 kN. Aplicado *span* de 20 mm apoiado pelas faces usinadas, assim sendo que as maiores tensões ocorrem nestas superfícies e a introdução de defeitos se manifestara nas propriedades mecânicas.

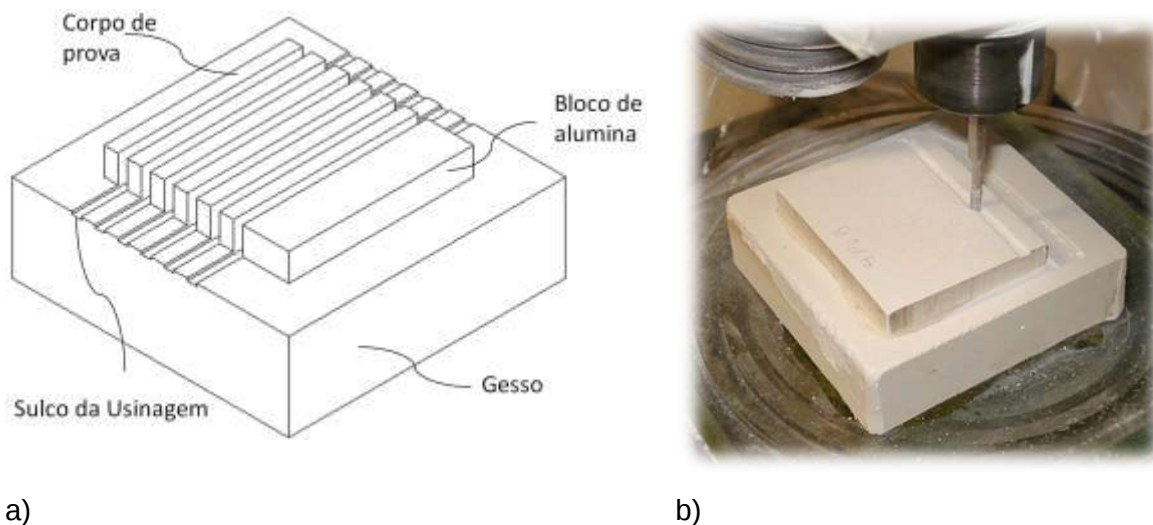


Figura 1 – Operação do corte dos corpos de prova, sendo a) planejamento e b) execução.

RUGOSIDADE

A rugosidade dos corpos-de-provas foi medida em um rugosímetro perfilmetro Form Talysurf Series i120 da marca Taylor Robson®. Foi utilizado o filtro ISO-2CR, Cutoff (Lc) de 0,25 mm e comprimento de dados de 1,5 mm para a medição da Rugosidade Média Aritmética (Ra).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram divididos em dois grupos principais, relativos ao desempenho do corte e a resistência mecânica, que considerou a introdução de defeitos superficiais. A Figura 2 mostra dois tipos de defeitos observados na aresta superior devido a falta de ancoramento superficial e na aresta inferior devido a fratura da separação da barra durante a usinagem do bloco aderido. Amostras com defeitos desta natureza não foram analisadas.

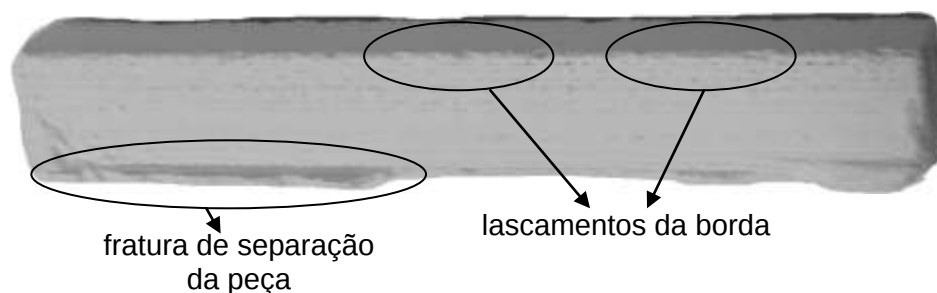


Figura 2 – Defeitos de borda ocorridos durante a usinagem.

Relativamente as perdas de propriedades mecânicas, a Figura 3 mostra que com o aumento da velocidade de avanço houve, para as peças com ligante PVB e ferramenta com diamante, uma perda de propriedade mecânica, isto é devido a introdução de defeitos na superfície de acordo com o aumento da rugosidade apresentado pela Figura 4.

Já as barras processadas com PVB e usinadas com ferramentas de CBN teve a ocorrência inversa, ou seja, houve melhora das propriedades mecânicas (Figura 3/PVB – CBN) com melhora da rugosidade (Figura 4/PVB – CBN), este resultado mostra a forte dependência do tipo do material abrasivo na usinagem a verde. Neste experimento foram encontrados os melhores valores, da ordem de 190 MPa de resistência a flexão.

Amostras processadas com PVAL tiveram os piores valores de resistência mecânica (Figura 3/PVAL – Diamante) onde não foi verificada influência significativa do avanço na faixa analisada, porém tiveram queda de rugosidade, este efeito é atribuído ao alto emplastamento observado na ferramenta, que removeu material com menos riscamento, porem impondo grande esforço, indicando uma desvantagem do PVAL como ligante (Figura 4/PVAL – Diamante).

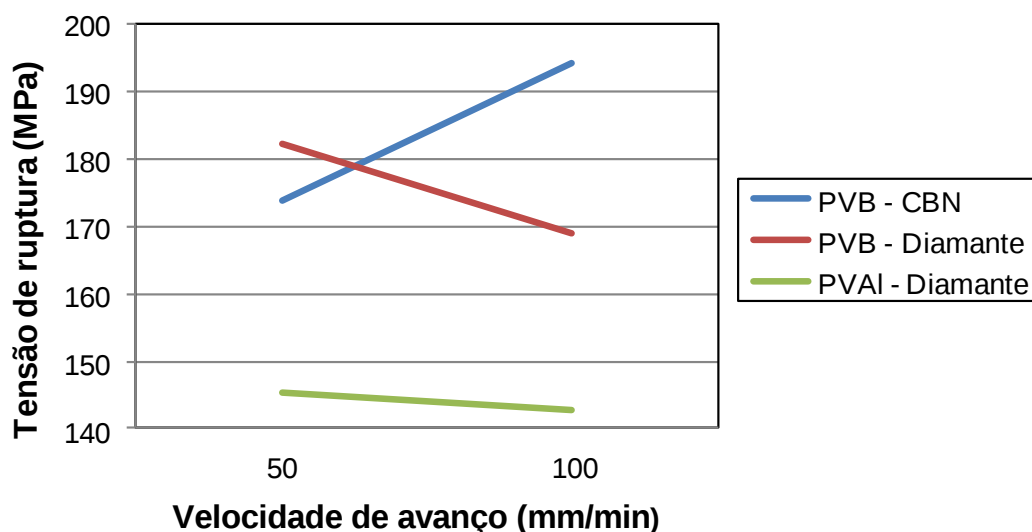


Figura 3 – Tensões máximas de ruptura obtidas em função da material da ferramenta e do ligante utilizados.

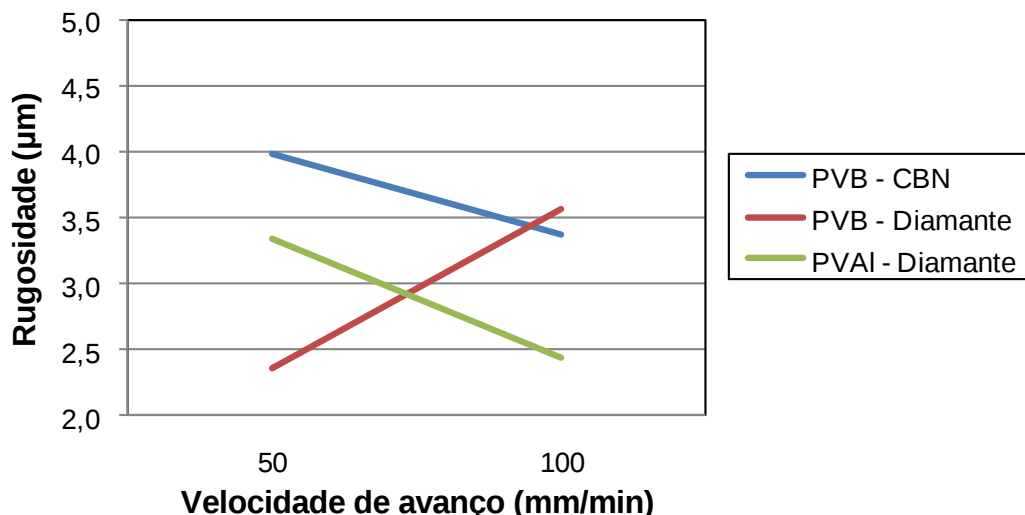


Figura 4 – Rugosidade média Aritmética obtida em função do material da peça e do ligante utilizados.

CONCLUSÕES

Os resultados mostram forte correlação entre o ligante empregado e o material da ferramenta. Estudos preliminares indicam vantagem no emprego de ligante PVB e ferramentas com abrasivo de CBN, valores extremos de 190 MPa contra 145 MPa foram observados.

O baixo desempenho da propriedade mecânica apresentado pela usinagem com a ferramenta com diamante deve-se a menor rugosidade das aresta de seus grãos em relação ao de CBN, o que dificultou a remoção de material da peça.

Comparado com resultados encontrados por Margarido (2011) que obteve tarugos da mesma alumina, processado com ligante PVAL, seco e granulado em *spray drier* e usinado com rebolo de alumina em *spindle* aerostático, obteve resistência mecânica de até 380 MPa contra os 190 MPa encontrados neste trabalho, pode-se concluir que todo a manufatura (materiais, ferramentas, equipamentos e parâmetros de corte) interferem de sobremaneira nas propriedades mecânicas do produto e devem ser consideradas no projeto de um produto.

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 BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SHEPPARD, L. M. Green machining: tools and considerations for machining unfired ceramic parts. *Ceramic Industry*, v. 149, n. 6, p. 65-77, 1999.
- (2) 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.
- (3) FILSER, F.; KOCHER, P.; GAUCKLER, L.J. Net-shaping of ceramic components. *Assembly Automation*, v. 23, n. 4, p.382–390, 2003
- (4) SU, B.; DHARA, S.; WANG, L. Green ceramic machining: a top-down approach for the rapid fabrication of complex-shaped ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 28, p. 2109-2115, 2008.
- (5) SALOMONI, A.; ESPOSITO, L.; TUCCI, A.; STAMENKOVIC, I. Bioceramic Implants Obtained by Near-Net-Shaping of Colloidal Suspensions. *Advanced Engineering Materials*, v. 3, n. 4, 2001.
- (6) SCHELLER, W. L. Conventional machining of green aluminum/aluminum nitride. *The Ohio Journal of Science*, v. 94, p. 151-154, 1994.
- (7) AYDIN, A.; BRISCOE, B. J.; SANLITURKB, K. Y. Dimensional variation of die-pressed ceramic green compacts: comparison of a finite element modelling with experiment. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 17, p. 1201-1212, 1997.
- (8) EL-WARDANY, T.; BARTH, R.; HOLOWCZACK, J.; TREDWAY, W.; CHEN, L. J. Optimum process parameters to produce green ceramic complex parts. *CIRP Annals – Machining Technology*, v. 58, p. 109-112, 2009.
- (9) ROBERT-PERRON, E.; BLAIS, C.; PELLETIER, S.; THOMAS, Y. Machinability of green powder metallurgy components: part I. characterization of the Influence of tool wear. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, 2007.
- (10) BESSHIA, T.; SATOH, T.; TSUTSUMI, I. Machining of alumina green bodies and their dewaxing. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 95, p. 133-138, 1999.
- (11) KAMBOJ, R. K.; DHARA, S.; BHARGAVA, P. Machining behaviour of green gelcast ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 23, p. 1005-1011, 2003.
- (12) 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.

- (13) KING, G. A. Ceramic technology and processing. Noyes Publication: William Andrew Publishing, Norwich, New York, p.528, ISBN 0-8155-1443-3, 2002.
- (14) LIAU, L.C.; CHOU, W.; WU, R. Photocatalytic lithography processing via poly(vinyl butyral)/TiO₂ photoresists by ultraviolet (UV) exposure. Department of Chemical Engineering and Materials Science, Yuan Ze University, Chung-Li 320, Taiwan, Republic of China. Ind. Eng. Chem. Res. V.47, p.2273-2278, 2008.
- (15) MARINESCU, I. D.; HITCINER, M.; ULHMANN, E., ROWE, W. B.; INASAKI, I. Handbook of machining with grinding wheel. 1. ed. Wakefield: CRC Press, p.596, ISBN 1-57444-671-1, 2007.
- (16) MARGARIDO, A. Estudo da influência da força de corte da usinagem a verde nas propriedades mecânicas de cerâmicas sinterizadas. 2011, 115p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Projeto Mecânico) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

GREEN MACHINING STRATEGY DIRECTED TO THE PROJECT OF CERAMIC PARTS

ABSTRACT

This paper deals with the green machining strategies applied to the project and manufacture of ceramic products, including process selection, cutting parameters and tools. The green machining is a technique structured on the philosophy of the "near net shape", which applied in the manufacture of ceramic pieces, makes it possible to obtain complex parts in your most structural strength, for that, the introduction of defects should be minimized and the critical defects eliminated. In search of a piece on a bar format, was selected for the process of machining a cylindrical flat tip tool. The machined bars were sintered and analyzed for the influence of the binder, the abrasive tool and the cutting parameters. Were evaluated metrologically and for sintered mechanical strength. The best conditions found in the bodies were processed with PVB binder machined with CBN abrasive tools, with cutting speed of 100 mm/min, reaching 190 MPa of fracture strength. The database generated allows the planning of a decision-making in the design and manufacture of parts with complex and generic shapes.

Key-words: machining strategy, project, manufacturing, ceramics, green machining.