

INFLUÊNCIA DAS FORÇAS DE CORTE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CORPOS DE ALUMINA RETIFICADOS A VERDE

A. Margarido, D.T.L Ramos, J.C. Risardi, B. M. Purquerio, C. A. Fortulan

Departamento de Engenharia Mecânica - Escola de Engenharia de São Carlos – USP

Av. Trabalhador São-carlense, 400 – 13566-590 – São Carlos - SP

cfortula@sc.usp.br

RESUMO

O estudo trata da correlação das forças de usinagem a verde com as propriedades mecânicas de corpos sinterizados de alumina. Durante o processo de usinagem os esforços de corte determinam a introdução de defeitos críticos na superfície e são geralmente estes defeitos que governam as propriedades mecânicas das cerâmicas após sinterização. O trabalho objetiva a elaboração de um sistema de aquisição de torque na usinagem, que foi utilizado como modelo para prever a associação dos esforços conjugados durante o corte. Corpos de prova cilíndricos em alumina foram usinados com diferentes agressividades de corte, sinterizados e ensaiados quanto à resistência mecânica à flexão. Os resultados mostraram a importância de tratamento térmico acima da temperatura de transição vítrea do ligante e a remoção da água residual. Foi identificado um limite para taxa de remoção próxima a $10.000 \text{ mm}^3/\text{min}$ com potência consumida de 900W a partir da qual o nível de resistência das peças perdeu a estabilidade e ocorreram rupturas.

Palavras Chaves: Usinagem por abrasão, *grinding*, projeto, *green machining*, *ceramic green machining*.

INTRODUÇÃO

A usinagem à verde é um método alternativo, para a fabricação rápida de peças cerâmicas em formatos complexos, onde a cerâmica é usinada no estado verde 'não sinterizado' através da tecnologia CAD/CAM. Diferentes técnicas de

fabricação por usinagem foram investigadas desde o final dos anos 80, incluindo sistemas ultrassônicos, descargas elétricas (EDM), sistemas a laser, usinagem eletroquímica (ECM) e usinagem com jato abrasivo (AJM), todas com alto custo de desenvolvimento inicial e com restrições sobre os tipos de materiais que podem ser trabalhados, limitando a utilização destes processos. Processos de usinagem a verde para modelar cerâmica, geralmente são empregados para pequenos volumes, alta precisão, formatos complexos e são economicamente viáveis. A usinagem é controlada através de comando numérico (CNC), onde um modelo CAD 3D é primeiro decomposto ou cortado em representações de finas camadas longitudinais. Em seguida, cada camada é seletivamente removida até se alcançar o formato e as dimensões desejadas. O processo de retificação tem sido utilizado na usinagem a verde há décadas na fabricação de velas de ignição, dedais de sondas lambda e filtros cerâmicos. Atualmente atende a aplicações como implantes ortopédicos e restaurações dentárias, onde a cerâmica ou bio-cerâmica tem sido largamente aplicada.

Esta operação é de baixo consumo energético e de grande capacidade de remoção de material, não exige ferramentas extremamente duras, tendo, entretanto sua taxa de remoção de material limitada devido a baixa resistência mecânica que estes componentes apresentam neste estado, geralmente inferiores a 8 MPa [KAMBOJ et al (2003); KEVIN, WU X. L. et al. (1995); REED (1995) p.628].

A retificação é um processo de usinagem por abrasão que remove material da peça através da ação de grãos abrasivos espalhados aleatoriamente pela superfície do rebolo. Scheller 1996 afirmava que pesquisas na área de usinagem a verde de cerâmicas são extremamente limitadas. Embora extensivamente aplicada na indústria, pouco se relata à respeito da otimização do processo, seleção de rebolos abrasivos e defeitos críticos introduzidos durante a usinagem.

Estudos mostram a influência da pressão de corte na qualidade da usinagem à verde, com o aumento da pressão de corte o mecanismo de remoção de material atravessa a fase inicial de fratura intra-aglomerado para uma fase mista e subsequente fase inter-aglomerado, onde se verifica maiores danos superficiais. KAMBOJ et al (2003). Outras características são decisivas no mecanismo de corte, entre elas o tamanho da partícula, ligante (tipo, concentração) e humidade. Este aspecto demonstra a necessidade de estudar os efeitos das variáveis da manufatura.

Para aumentar a resistência estrutural de um *Blank* (corpo de prova), é adicionado ao pó cerâmico o ligante, dentre eles destaca-se o álcool polivinílico (PVAL), cuja sua excelente resistência química e propriedades físicas têm estendido amplamente seu uso industrial. Este polímero é solúvel em meio aquoso, além de excelente adesivo é resistente a solventes, óleos e graxas. Apresenta ótimas propriedades como agente emulsificante devido a sua baixa tensão superficial. O PVAL completamente hidrolisado de alta massa molar (PM 22.000) apresenta temperatura de transição vítrea (T_g) à aproximadamente 85°C, enquanto com menor grau de hidrólise (87 a 89%), tem este valor em torno de 58°C.

A granulação também interfere na taxa de desgaste abrasivo a verde no qual os mecanismos de desgaste podem ser influenciados por vários fatores como: tamanho do aglomerado, dureza, umidade e ligante.

A usinagem de *Blanks* a verde difere da usinagem de compactos pré-sinterizados (*White Machining*). Ao fazer à usinagem a branco (pré-sinterizada), as micro rachaduras ocorrem por um processo de fratura frágil. Em corpos a verde, devido ao vínculo orgânico entre as partículas de alumina, o processo de remoção de material é caracterizado mais pela formação de microplaquetas dúcteis do que pela fratura frágil, o que possibilita a produção de superfícies livres de lascamentos. Para que o processo de corte seja eficiente e produza uma qualidade uniforme, a taxa de remoção de material pode ser aumentada através do aumento da profundidade de corte e velocidade de corte, Jahanmir (1996). Já Fortulan (2011) relatou perdas de propriedades mecânicas na usinagem à verde de tarugos de porcelana em condições industriais com o aumento da agressividade de corte, seja tanto pelo avanço como pela taxa de remoção, Figura 1.

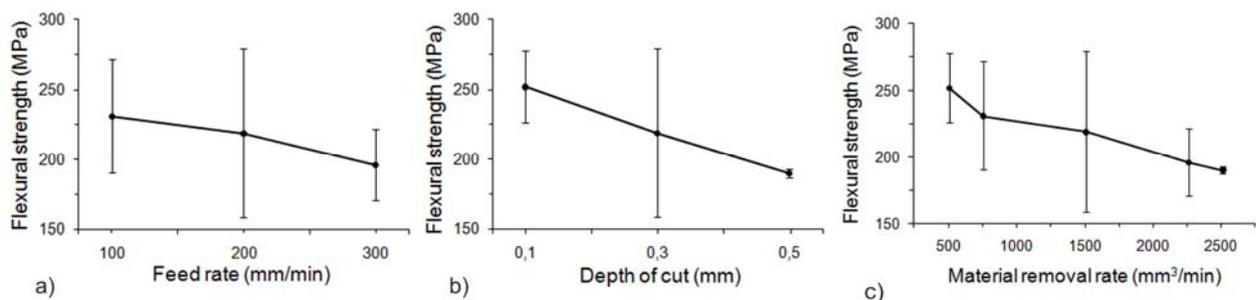


Figura 1- Resistência à flexão como função dos parâmetros de corte: a) avanço; b) profundidade de corte; c) taxa de remoção. (Fortulan 2011)

Baseando na rugosidade, Jahanmir (1996) salienta que a velocidade do corte, tem muito pouca influência na qualidade de superfície da cerâmica a verde, portanto pode ser aumentada oferecendo pouco risco de danificar a qualidade da superfície, sendo assim o tempo de usinagem pode ser reduzido. Outra vantagem de aumentar a velocidade de corte é a redução do desgaste da ferramenta. Isto pode inteiramente ser explorado em operações de retifica e é limitado somente pela velocidade disponível máxima do eixo árvore. Entretanto, devido às limitações impostas pela resistência do material e os esforços impostos por aumento das forças centrífugas, as velocidades de corte não podem ser aumentadas indefinidamente.

MATERAIS E MÉTODOS

Um banco de aquisição dados experimentais foi projetado para medir as forças de corte através da medida de torque de usinagem, e correlacioná-lo com os danos estruturais críticos (Figura 2). Busca-se por informações de rotação, profundidade de corte e de velocidade de avanço combinadas para desempenho maximizado.

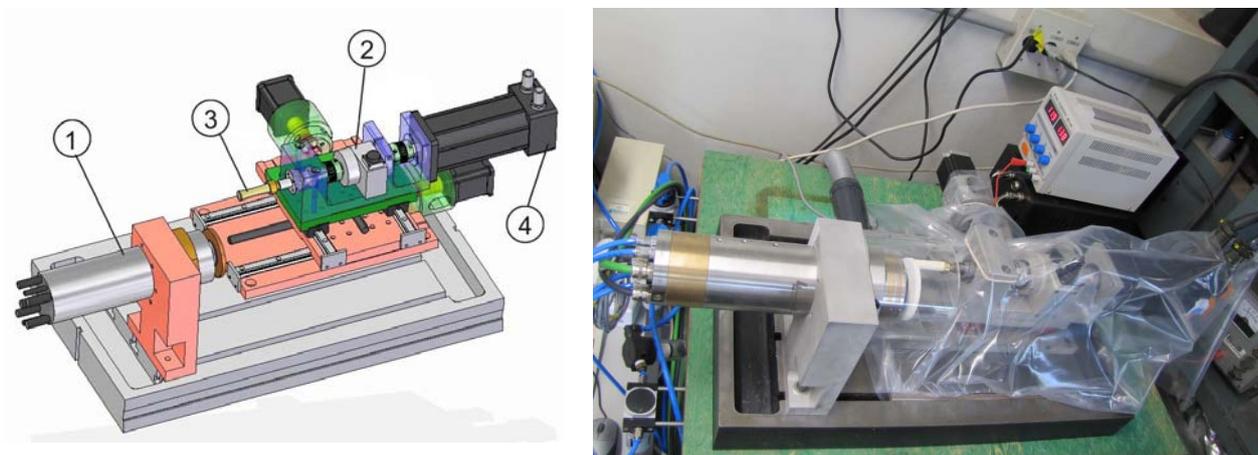


Figura 2 – Banco de ensaio de usinagem em a) desenho esquemático onde: 1- cabeçote aerostático; 2- torquímetro; 3- tarugo à verde e 4 servo motor, em b) imagem do equipamento.

O cabeçote de usinagem aplicado foi o *dicing spindle* D05716/3 de 2,4 kW produzido pela *LoadPoint bearings Limited* (UK), instrumentado por *Drive* (interface de controle de do cabeçote) de 20 amperes capaz de operar com rotações de até 480.000 rpm; sistema de compensação para o cabeçote motor choke 11A 350 μ H) e *TEST BOX* (Unidade de controle manual) (SIEB & MEYER AG).

Os rebolos foram fabricados sob encomenda pela Norton (Saint Gobain Abrasivos Ltda). A especificação técnica para usinagem à verde, onde a dressagem é feita com ponta única de diamante e sem refrigeração: *REBOLO RETO 75X6X19 38A80 IVH 45 M/S*, onde os índices representam o diâmetro externo ($\varnothing e$)= 70mm; furo ($\varnothing i$)= 19 mm e espessura (e)=6mm; **I**-dureza moles; **V**- vitrificado; **H**-denominador industrial (Norton); **38A**- Branco e **80**-tamanho abrasivo em #80 mesh, com dureza de liga média indicada para trabalho médio-desbaste/acabamento.

A ponta dressadora aplicada foi a *diaform* lapidada de um monocristal natural de diamante, fabricada pela Master Diamond com ângulo de lapidação da ponta de 40° e raio de 0,5mm. O dressador foi posicionado a 45° com altura centrada ao do rebolo e dressada a face de corte e superfície periférica. As condições de dressagem por passe foram: profundidade: 0,05mm, avanço 30mm/min, rotação do rebolo 1000rpm.

O porta ferramenta (Figura 3) foi desenvolvido para fornecer torque suficiente à operação e conter um torquímetro entre o sistema motor e o tarugo bruto. Foi aplicado o Sensor de Torque MKDC-5 de capacidade máxima de 5N.m da *MK Controle e Instrumentação Ltda* e Servo-Motor (*WEG SWA56-2,5-20*) com Servo-Converter (*WEG SCA050004*). Para controle e aquisição dos dados em tempo real de usinagem foi aplicado módulo e aquisição de dados USB-6009 (14 BITS de resolução) da *National Instruments Brazil Ltda*.

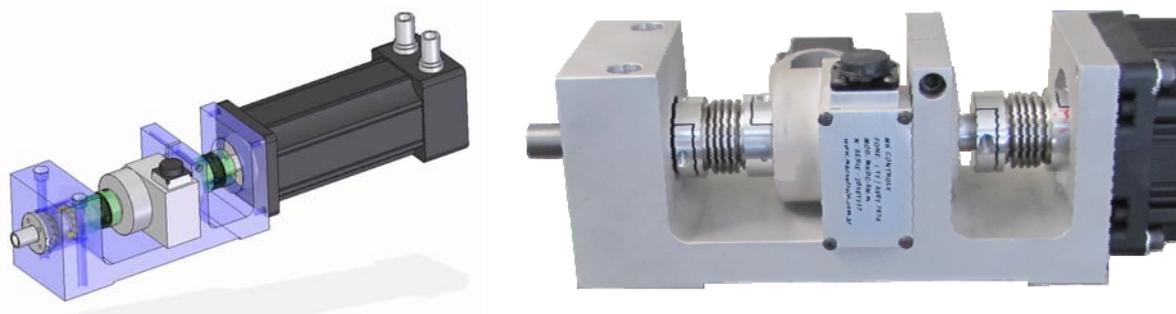


Figura 3- Suporte de *blank* integrado com torquímetro e servomotor de acionamento

Formulação Cerâmica

A mistura/desaglomeração da alumina foi realizada em moinho de jarros com elementos de moagem de cilindros de zircônia (\varnothing 12mm, h 12mm). Uma suspensão com 30 vol% de pó foi elaborada com volume líquido composto por 68 vol% de água

destilada e deionizada, 1 vol% de PVAI e 1 vol% de poliacrilato de amônia (Dispersal 130). O granulado do pó foi obtido pela secagem em *spray drier*.

Alumina Calcificada 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

Conformação

É objetivado corpos de prova sinterizados nas dimensões finais de ($\sim\text{Ø}5,6 \times 50\text{mm}$). Tarugos brutos foram prensados por prensagem isostática a 100MPa por 30s na máxima pressão com dimensões próximas a $\sim\text{Ø}11 \times 55\text{mm}$. Foram deixados em repouso por período superior a 48h, 5 amostras foram reservadas neste estado e as demais tratados termicamente à 100°C por 12 horas. Os tarugos brutos foram usinados à verde na forma final do corpo de prova $\text{Ø}6,5 \times 40\text{mm}$ e sinterizados a 1600°C-2h.

Análise Experimental da Usinagem

Os corpos cilíndricos foram usinados com variações das condições de usinagem tais como: avanço longitudinal, profundidade de corte perfazendo diferentes taxas de remoção de material. Em todos os experimentos trabalhou-se com velocidade periférica de rebolo de 45 m/s, A Tabela 1 apresenta as condições de usinagem aplicadas e a Figura 4 uma imagem instantânea da operação de usinagem.

Tabela 1. Condições experimentais de usinagem.

Teste	Avanço (mm/min)	Profundidade de corte (mm)
F100a0,5	100	0.5
F200a0,5	200	
F300a0,5	300	
F400a0,5	400	
F100a1,0	100	1,0
F200a1,0	200	
F300a1,0	300	
F400a1,0	400	

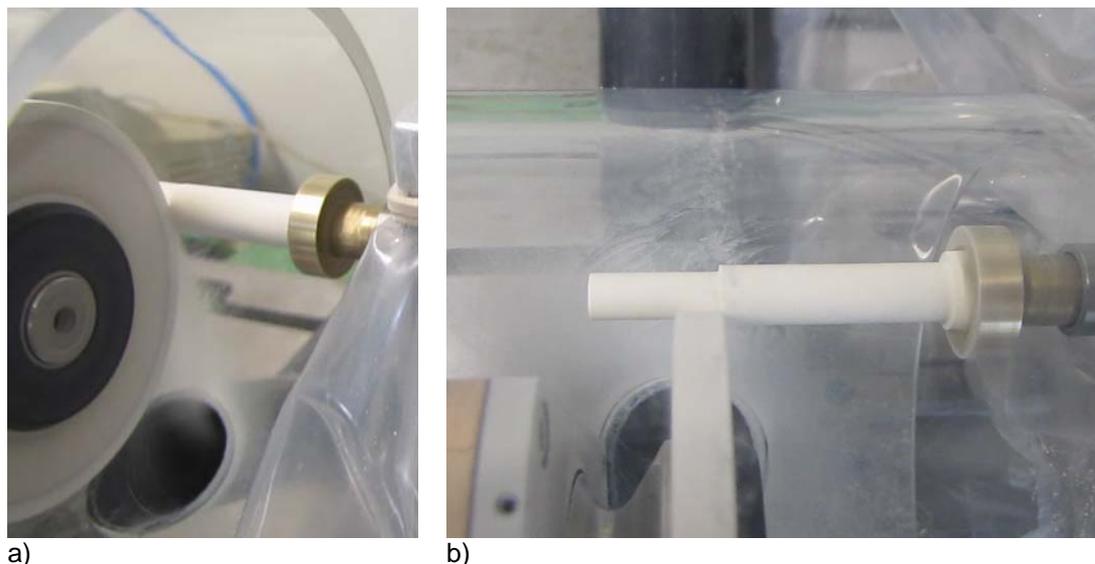


Figura 4- Imagem da operação de usinagem, em a) vista lateral e em b) vista superior.

Os dados coletados através do LABVIEW geraram uma lista de pontos de tempo *versus* torque e se localizou os últimos dois passes de usinagem. Considerou-se a média dos picos máximos de corte excluída da média do toque em vazio (recuo do porta ferramenta).

Resistência Mecânica

Quarenta amostras cilíndricas foram analisadas para determinar a resistência à ruptura por flexão a quatro pontos (ASTM C1684-08) utilizando a Máquina Universal de Ensaio da EMIC com velocidade do travessão em 0,2mm/min com célula de carga de 20kN.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 5 mostra a resistência mecânica das amostras sinterizadas em função do aumento da taxa de remoção composto pelas profundidades de corte de 0,5 e 1,0 mm. É observado que com o aumento da velocidade de corte há uma melhoria nas propriedades mecânicas relacionadas ao acabamento superficial, as Figuras 7 (a), (b), (c), (d) e (e) ilustram o aumento da intensidade de defeitos superficiais em baixos avanços, porém foi constatado um limite de velocidade de avanço próximo a 400 mm/min observado pelo aumento das barras de erros, sendo que, ultrapassado este limite foi verificado uma região instável onde ocorreu a

ruptura catastrófica dos corpos durante o percurso do rebolo, isto devido aos esforços de corte que ultrapassaram a resistência mecânica da peça. A introdução de defeitos superficiais foi constatada pela variação nos resultados expressa bala barra de erro, em menor contraste ao observado por Fortulan (2011) na usinagem de porcelana mostrada pela Figura 1, o diferencial está no cabeçote de usinagem que neste trabalho foi com mancais aerostáticos onde os ruídos e vibrações foram extremamente diminuídos e também devido a reserva de potência do cabeçote de 2400W contra 500W utilizado naquele trabalho, outra diferença foi no uso do *spray drier* e do tamanho médio de partícula de 0,4 μm que evitou a usinagem em regime intergranular.

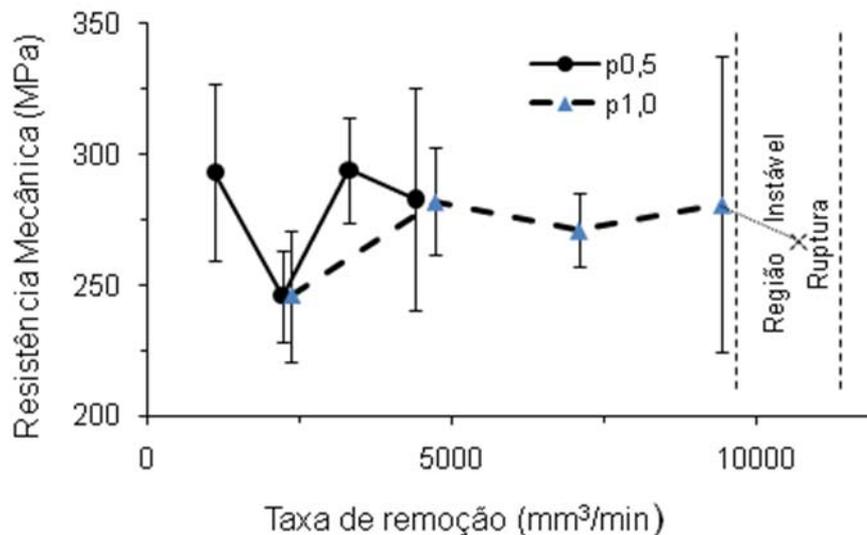


Figura 5 – Resistência mecânica das amostras sinterizadas em função da taxa de remoção.

A Figura 6 mostra a potência consumida em Watts pela usinagem obtida à partir do torque medido, nota-se um aumento do torque com o aumento do avanço e também com a profundidade de corte ou certa similaridade com a taxa de remoção independente das condições de composição (avanço e profundidade).

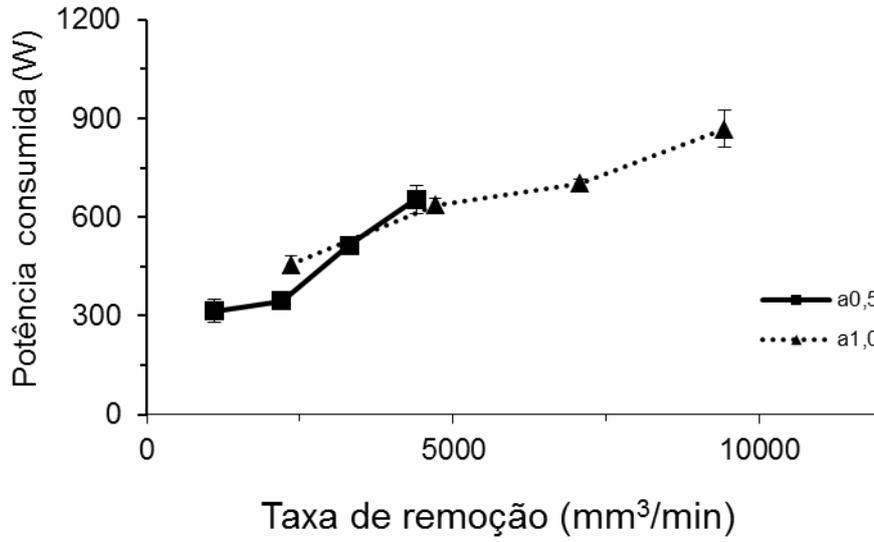
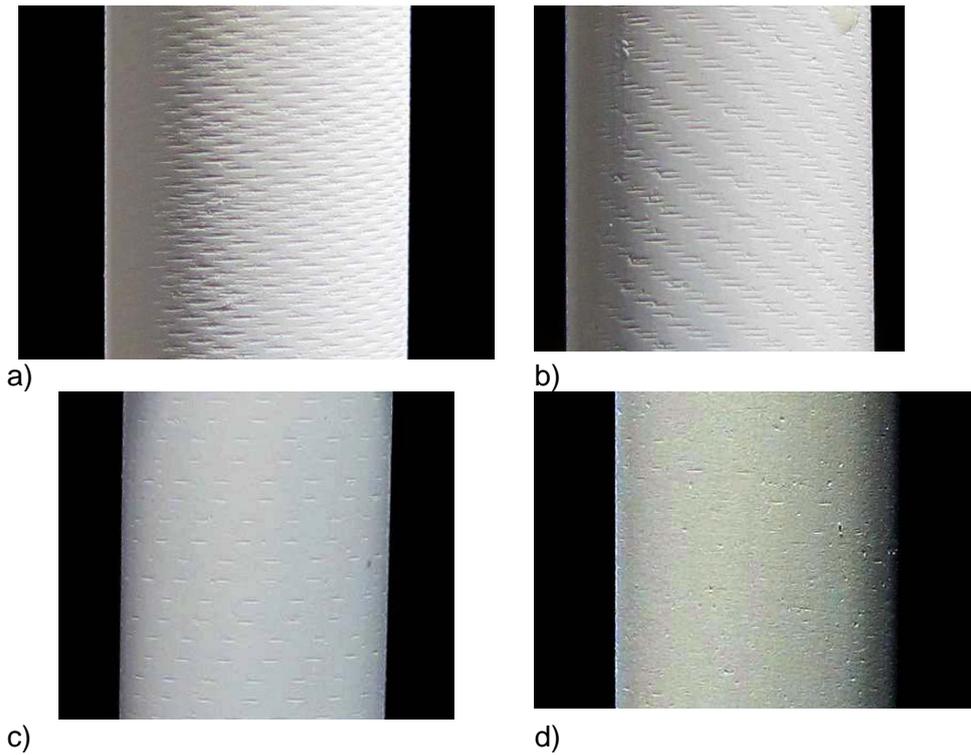
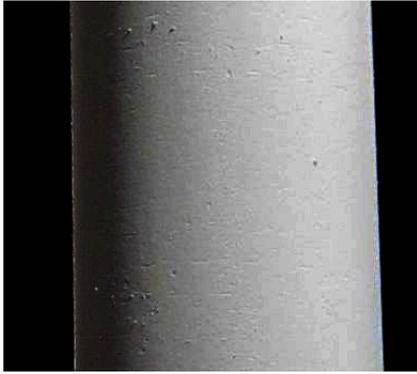


Figura 6 – Potência de corte consumida em função da taxa de remoção





e)

f)

Figura 7 – Imagem da superfície recém usinada, em a) F100a0,5; em b) F200a0,5; em c) F200a0,5; em d) F300a0,5; em e) F400a1,0 e em f) imagem das amostras sinterizadas

Relativo ao ligante foi usinado amostras pós-prensagem (48 horas de repouso) e tratadas à 100°C. As peças tratadas tiveram valor de resistência média de 298 MPa enquanto que sem o tratamento se obteve 258 MPa, evidenciando a necessidade do tratamento térmico. Ressalta-se que a potência consumida para a usinagem da peça sem tratamento foi de 53 W e para a tratada 315 W, ou seja, as amostras não tratadas forneceram maior lubrificação (água adsorvida), porém ocorreu parte da remoção por mecanismo intergranular com mais defeitos superficiais e com empastamento do rebolo; na tratada termicamente, tem-se maior rigidez com remoção intragranular. O tratamento térmico acima da temperatura de transição vítrea (T_g 87°C – 89°C) do PVal além de remover a umidade residual alivia a tensão residual do ligante (PVal)

CONCLUSÕES

Com o emprego de um cabeçote com mancais aerostáticos de alta potência e baixo ruído não se detectou a introdução de defeitos críticos na superfície devido à ação do rebolo, porém detectou-se um limite de velocidade em função da profundidade de corte que excedeu a resistência mecânica da peça que ocasionou em ruptura catastrófica.

Foi identificada uma correlação entre potência consumida e taxa de remoção, a qual fornece informação muito importante para projetos de uma máquina de usinagem á verde de produtos cerâmicos em alumina. Para estas condições experimentais se identificou a taxa de remoção de 8.000 mm³/min com potência de pico consumida de 800W como a melhor relação de custo/benefício.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão do projeto Universal CNPq (479041/2009-1), ao Instituto de Bio-fabricação (INCT-BIOFABRIS) / Bolsa mestrado CAPES e Bolsa de Iniciação Científica PIBIC 2010.

REFERENCIAS

- (1) KAMBOJ, R.K.; DHARA, S.; BHARGAVA P. Machining behaviour green gelcast ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**. v. 23, p. 1005-1011. 2003.
- (2) KEVIN WU, X.L.; MCANANY, W.J. Acrylic binders for green machining. **American Ceramic Society Bulletin** v. 75, p. 61–64. 1995.
- (3) REED, J.S. **Principles of ceramics processing**. 2 ed. Ed. John Wiley & Sons, Inc. USA, 1995.
- (4) SCHELLER, W.L.I.; WANMUHAMAD, W. Machining of green Si₃N₄ polymer bonded ceramic materials. **Material and Manufacturing Processes**. v. 11, n. 5, p. 775-787. 1996.
- (5) Said Jahanmir, M. Ramulu, Philip Koshy Machining of Ceramics and Composites Manufacturing Engineering and Materials Processing 1996.
- (6) Fortulan CA; Gambale BVV; Chinelatto AL; Purquerio BM. Influence of alumina content on green machined electrical porcelain. *Industrial Ceramics*, v.31, p.1-7, 2011.

INFLUENCE OF CUTTING FORCES IN THE MECHANICAL PROPERTIES OF BODIES OF ALUMINA GREEN GRINDED

ABSTRACT

It is presents the measurement of machining forces the green specimens of alumina and its correlation with the mechanical properties of sintered bodies. This manufacturing technique is extensively used in the machining of advanced ceramics. During the machining process the cutting forces determine the introduction of critical defects on the surface and that these defects are usually govern the mechanical properties of ceramics after sintering. The work aims at the preparation and assembly of data acquisition system of machining effort, seeks to identify the boundaries of aggressive cutting in maintaining the integrity of the body with economic output. Measures torque machining and grinding wheel peripheral speed may represent a model to predict the combination of efforts will be evaluated and machining. Cylindrical specimens were machined with different cutting aggressiveness, sintered and tested as to strength, compression and bending to four points.

Key-words: green machining, critical defects, ceramic manufacturing