

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM DE COMPONENTES DE ALUMINA A VERDE E PARCIALMENTE SINTERIZADOS EM FRESADORA CNC

Silva, A.A.; Moreno Silva, L.H.; Silva, A.A.; Genova, L.A.
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN
Av. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária – São Paulo
andre_silva@usp.br

Resumo:

O processo de usinagem de cerâmicas sinterizadas é uma etapa lenta e onerosa na confecção de peças com geometrias complexas, devido à alta dureza e resistência ao desgaste do material. Uma alternativa que vem sendo cada vez mais empregada para a confecção de peças com geometria complexa é a usinagem dos corpos no estado a verde ou parcialmente sinterizados. O processo de usinagem destas peças sofre forte interferência das características do material (como resistência mecânica, dureza, densidade aparente), das características da ferramenta de usinagem (material, geometria da ponta, granulometria) e parâmetros de operação da máquina (como avanço, rotação e profundidade de corte, lubrificação). Neste trabalho estudou-se as condições de usinagem de peças de alumina prensadas isostaticamente, a verde ou parcialmente sinterizadas (1000 a 1200 °C), empregando-se uma fresadora CNC simples e de baixo custo. Parâmetros como rotação, geometria e granulometria de ferramenta, taxa de avanço, profundidade de corte e lubrificação foram variados empregando-se o método de Taguchi de modo a reduzir o número de experimentos. A qualidade da usinagem e a influência dos parâmetros estudados foram avaliados pela rugosidade da superfície usinada e pela integridade de suas bordas. Verificou-se, como era de se esperar, o benefício da refrigeração no desgaste da ferramenta e também no acabamento da superfície verde e sinterizada. Foi possível chegar a um conjunto de condições relacionadas às características dos corpos cerâmicos e aos parâmetros de usinagem que permitiram obter superfícies com baixa rugosidade ($R_a < 0,7 \mu m$), livres de trincas e sem lascamento das bordas.

Palavra chave: usinagem a verde, alumina, processamento, design de experimentos, Taguchi

Introdução

Materiais cerâmicos reúnem um conjunto impar de propriedades e características, como por exemplo, a elevada dureza, resistência mecânica e resistência ao desgaste acrescido da baixa densidade e da possibilidade de ser aplicado em altas temperaturas e ambientes agressivo. Estas propriedades possibilitam que sejam utilizados em uma ampla variedade de aplicações: estruturais, elétricas, químicas, nucleares, térmicas, etc. Apesar disso os componentes cerâmicos ainda não ocupam todo o espaço possível na indústria, e dentre as razões para isso, segundo Jansen e co-autores^[1], estão o alto custo dos componentes cerâmicos, a baixa tenacidade à fratura, o conhecimento insuficiente dos profissionais da área de materiais, e a indisposição de se alterar projetos, adequando-os às especificidades dos materiais cerâmicos.

A ampliação do uso de materiais cerâmicos vem acompanhada da exigência de confecção de peças cada vez mais complexas no que se refere à geometria e com elevada precisão dimensional^[2,3]. Apesar dos avanços conquistados na área de conformação de materiais cerâmicos (injeção, gel-casting, direct coagulation casting, tecnologias de manufatura aditiva, etc.), muitas peças só podem ser produzidas se submetidas a etapas de usinagem. A usinagem de corpos cerâmicos pode ocorrer em três diferentes situações: nas peças já sinterizadas, nas peças parcialmente sinterizadas ('bisque ceramic' ou 'blank') e nas peças a verde ('green ceramic'), conformadas e secas.

A usinagem de cerâmicas sinterizadas se mostra, na maioria das vezes, inviável devido à alta dureza e baixa tenacidade à fratura destes materiais, à lentidão do processo de remoção, e aos altos custos envolvidos^[3-6]. Por estes motivos a usinagem de cerâmicas sinterizadas somente se justifica em situações especiais, sendo fundamental o desenvolvimento de processos alternativos, como é o caso da usinagem de peças a verde ou parcialmente sinterizadas. Atualmente esta usinagem é empregada para a fabricação de peças em grande escala (como na produção dos isoladores das velas de ignição) ou em escala menor (como os rotores de motores turbo, cabeças de fêmur ou componentes odontológicos, coroas, abutments, etc.). Para cada um dos diferentes processos de usinagem as peças cerâmicas e o ferramental de usinagem devem operar em condições adequadas, sob pena de o processo ser ineficiente ou mesmo inviável, já que cada operação aplica um diferente conjunto de esforços, que podem levar à fratura, lascamentos, início ou propagação de trincas, ou mesmo a uma rugosidade inadequada.

O sucesso da operação de usinagem de cerâmicas a verde ou parcialmente sinterizadas dependem de um razoável número de fatores que envolvem desde as

características do pó cerâmico, densidade e resistência mecânica da peça conformada, a parâmetros de usinagem, tipo de máquina e de ferramenta utilizada, etc. A qualidade da usinagem pode ser avaliada por meio da quantidade de esboroamento provocado, pela retenção de arestas^[7] ou, principalmente, pelo acabamento superficial obtido (rugosidade), que é um fator de suma importância na avaliação da usinagem. Quanto melhor o acabamento de usinagem, menor a rugosidade do sinterizado, e maior a sua resistência mecânica, já que os defeitos superficiais são menores^[8-10]. O delineamento de experimentos (DoE) como ferramenta para estudar processos com muitas variáveis, vem sendo cada vez mais adotado. Dentre os diferentes métodos desenvolvidos para este delineamento e para a análise dos resultados, tem-se o método Taguchi, que é amplamente utilizado para o estudo de processos industriais. Particularmente no que diz respeito à usinagem, este método é comprovadamente eficiente.

Os avanços conquistados na etapa de conformação (com destaque para os novos ligantes orgânicos desenvolvidos e para o processo gel-casting), e na área de usinagem (com o sistema CAD-CAM, prototipagem rápida, escaneamento 3D, precisão dos equipamentos, ferramentas), promoveram um salto espetacular na área de usinagem de corpos cerâmicos, o que pode ser constatado pela confecção dos rotores cerâmicos a base de nitreto de silício ^[11], e pela amplitude da confecção de coroas dentárias de zircônia, produzidas sob medida, a partir de equipamentos com tecnologia CAD-CAM ^[12].

Neste trabalho avaliou-se como as diferentes condições de usinagem de peças de alumina prensadas isostaticamente, a verde ou parcialmente sinterizadas (1000 a 1200 °C), com o emprego de uma fresadora CNC simples e de baixo custo, interferiram na qualidade da usinagem. Parâmetros como pressão de compactação isostática (para as cerâmicas a verde), temperatura de sinterização parcial, rotação da ferramenta, taxa de avanço, profundidade de corte e lubrificação foram variados empregando-se o método de Taguchi de modo a reduzir o número de experimentos. A qualidade da usinagem foi avaliada pela rugosidade da superfície usinada e pela integridade de suas bordas. Definiu-se um conjunto de condições relacionadas às características dos corpos cerâmicos e aos parâmetros de usinagem que permitiram obter superfícies com baixa rugosidade ($R_a < 0,7$ mm), livres de trincas e sem lascamento das bordas.

Materiais e Métodos

Para este estudo foi utilizada a alumina CT-3000, fornecida pela Almatís. A alumina, dopada com 500 ppm de MgO, foi moída a úmido por 18 horas em moinho de bolas, com a adição de 1% em massa de PVA e 0,5% em massa de PEG-3000, e seca em spray-dryer.

Para os ensaios de usinagem foram compactados blocos de dimensão 40 x 15 x 5 mm. Para que se pudesse avaliar o efeito da pressão de compactação isostática e da temperatura de sinterização parcial, os blocos foram compactados uniaxialmente a 70 MPa, e isostaticamente a 100, 200 e 300 MPa, sendo que amostras compactadas a 200 MPa foram submetidas a tratamentos térmicos (sinterização parcial) em temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C, todos com taxa de aquecimento e resfriamento de 5 °C/min e patamar de 60 minutos na temperatura definida.

Estes blocos foram submetidos a operações de usinagem em uma fresadora CNC Sherline 4410, operada com o auxílio do software Mach 3, utilizando-se a ferramenta diamantada KG Sorensen 3098, para produzir canais nos blocos como na figura 1, sendo utilizada uma ferramenta para cada bloco. Foram realizados dois conjuntos de ensaios de usinagem, ambos empregando-se o Método Taguchi de design de experimentos (arranjo ortogonal L9, e o software Minitab v.16): no primeiro variou-se a pressão de compactação isostática (100, 200 ou 300 MPa) e os parâmetros de usinagem Avanço (25, 50 ou 100 mm/min), Profundidade (0,1 mm, 0,25 mm ou 0,40 mm) e Rotação (1600, 2200 ou 2800 rpm); o segundo conjunto foi realizado fixando-se a pressão isostática de compactação em 200 MPa, e variando-se a temperatura de sinterização parcial (1000, 1100 ou 1200 °C) e os mesmos parâmetros de usinagem do conjunto anterior. Além disso, este segundo conjunto foi repetido, aplicando-se a refrigeração da operação com água. Na Tabela 1 são apresentadas as condições de usinagem definidas pelo arranjo ortogonal L9.

Os corpos de prova usinados foram caracterizados quanto à rugosidade por meio de um rugosímetro Mitutoyo SJ-201 e por meio de um perfilômetro óptico ZeGage™. A análise dos valores de rugosidade obtidos com os ensaios realizados sob as diferentes condições permitiu que se obtivesse as melhores condições de usinagem para este material, com o equipamento e a ferramenta utilizados.

Resultados e Discussão.

Na Tabelas 2 são apresentados os valores de rugosidade (Ra, Rz e Rq) obtidos com a usinagem dos blocos de alumina a verde e parcialmente sinterizados, sendo que para

estes últimos avaliou-se também o efeito da refrigeração com água. A partir destes resultados, e com os cálculos estatísticos proporcionados pelo método Taguchi, foi possível analisar o efeito de cada um dos parâmetros variados, na qualidade da usinagem, por meio da rugosidade Ra e Rz.

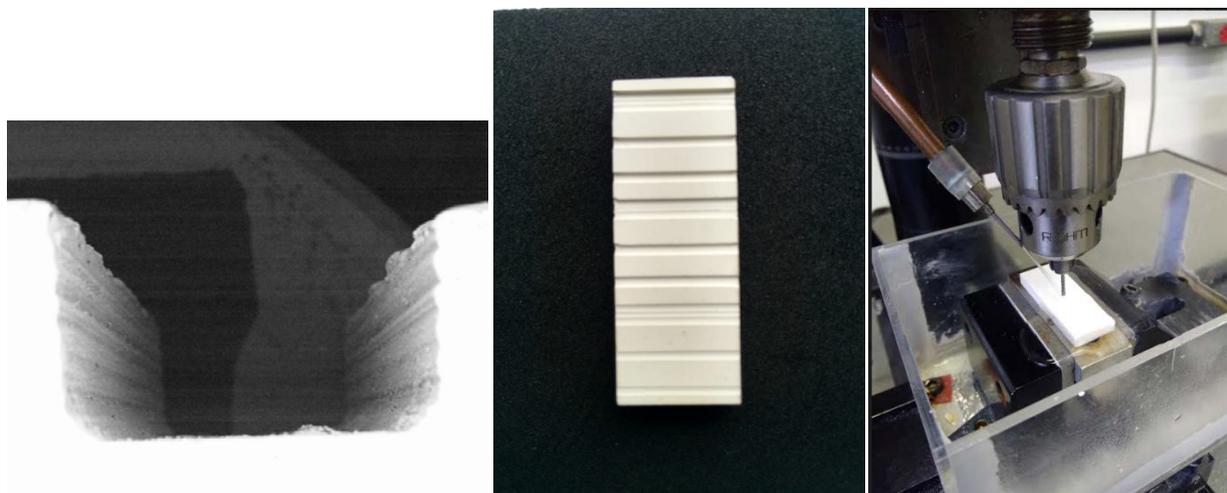


Figura 1 – Exemplo de um bloco de alumina usinado neste estudo.

Tabela 1 – Nove experimentos definidos pelo arranjo ortogonal L9 do Método de Taguchi

experimento	Avanço (mm/min)	Profundidade (mm)	Rotação (rpm)	Pressão (*) (MPa)	Temperatura(*) (°C)
1	25	0,1	1600	100	1000
2	25	0,25	2200	200	1100
3	25	0,4	2800	300	1200
4	50	0,1	2200	300	1200
5	50	0,25	2800	100	1000
6	50	0,4	1600	200	1100
7	100	0,1	2800	200	1100
8	100	0,25	1600	300	1200
9	100	0,4	2200	100	1000

(*) considere-se que as condições dos experimentos foram definidos pelas três colunas (Avanço, Profundidade e Rotação) e mais uma das outras colunas (Pressão ou Temperatura)

Nas figuras 2 (amostras a verde) e 3 (amostras parcialmente sinterizadas) são apresentados os gráficos indicando, para cada um dos parâmetros, a variação da rugosidade Ra média e da razão Sinal/Ruído (S/N) com os níveis empregados nas

operações. Segundo o método de Taguchi a razão Sinal/Ruído é mais adequada para a avaliação da qualidade do processo se comparado ao desvio-padrão. No caso da avaliação da rugosidade, utiliza-se a equação referente ao “quanto menor, melhor” para o cálculo da razão $S/N^{(x)}$.

Tabela 2 – Arranjo Ortogonal L9 definido pelo método Taguchi e os respectivos resultados de rugosidade (média de 5 medições), Ra, Rz e Rq, para os experimentos realizados.

Experimento	A seco			Com refrigeração			A verde		
	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq
1	0,63	4,41	0,80	0,62	4,86	0,81	1,35	9,18	1,93
2	1,04	5,70	1,30	0,79	5,55	1,01	1,18	6,42	1,44
3	1,00	5,58	1,27	0,71	5,15	0,00	2,75	15,13	3,47
4	0,68	4,92	0,88	0,76	5,52	0,98	1,89	10,67	2,37
5	0,75	5,16	0,93	0,85	6,35	1,14	2,10	11,98	2,69
6	1,07	6,07	1,38	1,90	11,14	2,32	0,96	5,86	1,21
7	1,27	7,11	1,58	0,66	5,14	0,87	1,80	12,05	2,46
8	1,68	11,21	2,20	1,44	9,60	1,83	2,94	17,19	3,81
9	0,95	6,72	1,24	1,52	10,41	2,00	1,41	7,88	1,73

Avaliando-se as curvas da figura 2, referentes à usinagem dos blocos de alumina a verde, compactados isostaticamente sob diferentes pressões, constata-se que a melhor condição de usinagem, ou seja, aquela em que se observa o menor valor para a rugosidade Ra, e que é definida como a que, para cada um dos parâmetros de processo que se variou, obteve-se o maior valor para a razão S/N, é definida pelo Avanço de 50 mm/min, a Profundidade de corte de 0,4 mm, a Rotação da ferramenta de 2200 rpm, e por fim, a pressão de compactação isostática de 200 MPa.

Na figura 3 são apresentadas as curvas semelhantes às da figura 2, mas referentes à usinagem dos blocos de alumina parcialmente sinterizados. Nesta figura 3 são apresentados no mesmo gráfico os dados obtidos com a usinagem sem e com refrigeração. A primeira constatação é que a refrigeração possibilita a usinagem de mais alta qualidade, com a rugosidade Ra significativamente menor, para todas as condições avaliadas. Acredita-se que, além da refrigeração da ferramenta em si, outro efeito que

proporciona a melhoria da qualidade da usinagem é a retirada dos debris pelo fluxo da água.

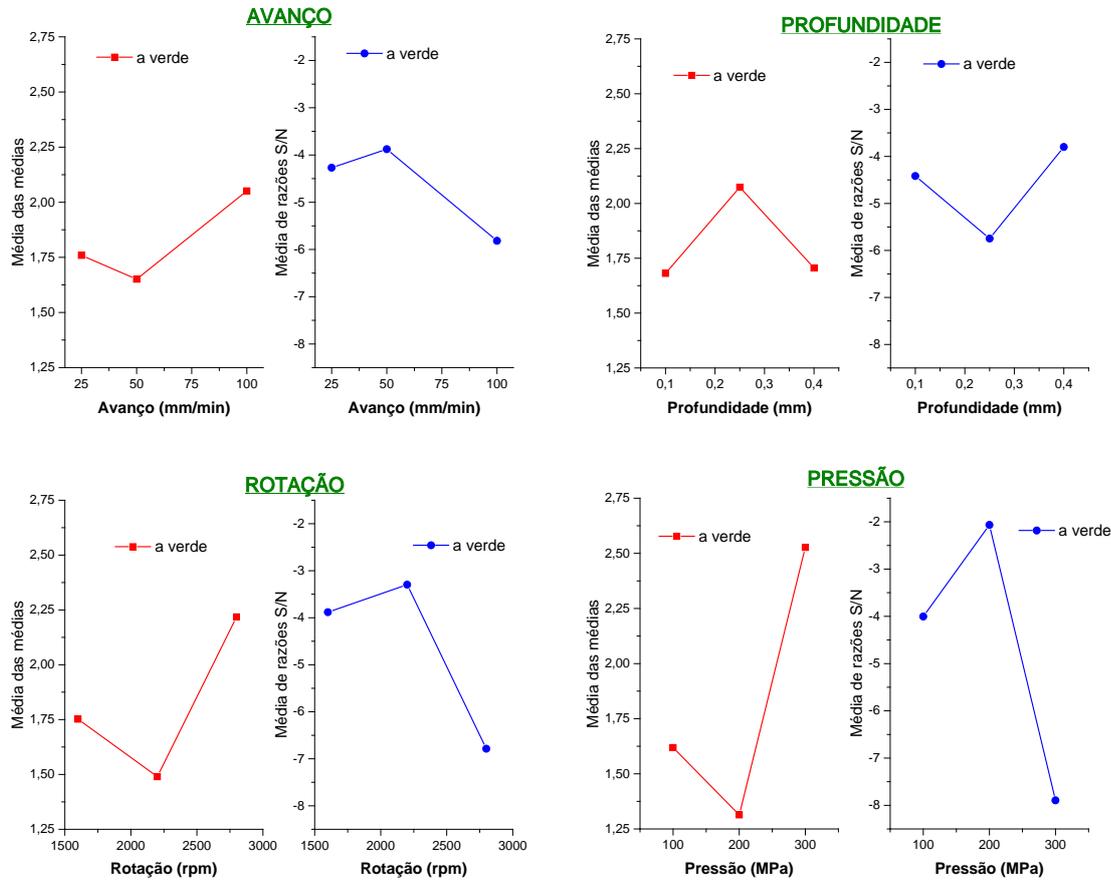


Figura 2 – Curvas da média das médias e da média da razão S/N em função dos níveis para cada um dos fatores estudados.

A avaliação quanto à melhor condição de usinagem para os blocos de alumina sinterizados parcialmente são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Melhores condições de usinagem para os experimentos realizados.

	Avanço (mm/min)	Profundidade de corte (mm)	Rotação (rpm)	Pressão (MPa)	Temperatura (°C)
A verde	50	0,4	2200	200	
Sem refriger.	25	0,1	2200		1000
Com refriger.	25	0,1	2800		1000

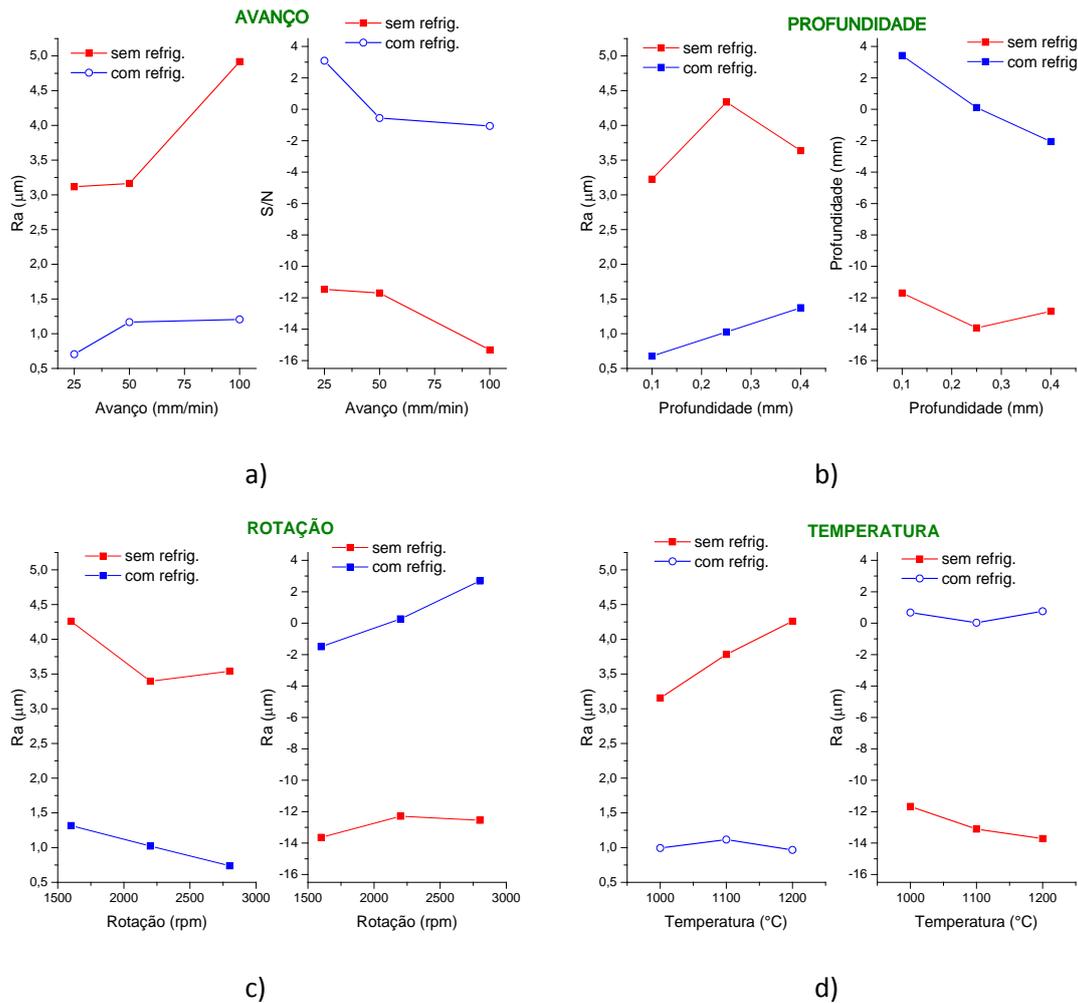


Figura 3 – Curvas da média das médias e da média da razão S/N em função dos níveis para cada um dos fatores estudados. São apresentados os valores obtidos para a usinagem com e sem a refrigeração.

Na figura 4 são apresentadas micrografias de blocos usinados sob as melhores e piores condições de usinagem para a alumina a verde, e para a alumina parcialmente sinterizada. Constata-se que há uma coerência entre estas micrografias e os valores obtidos com os dados de rugosidade. Obteve-se, por exemplo, para a melhor condição de usinagem com refrigeração, uma rugosidade Ra de 0,61 mm, enquanto que para a pior condição de usinagem sem refrigeração, o Ra obtido foi de 2,96 mm.

Na figura 5 é mostrado como exemplo, a figura produzida pelo perfilômetro óptico ZeGage™ utilizado no estudo.

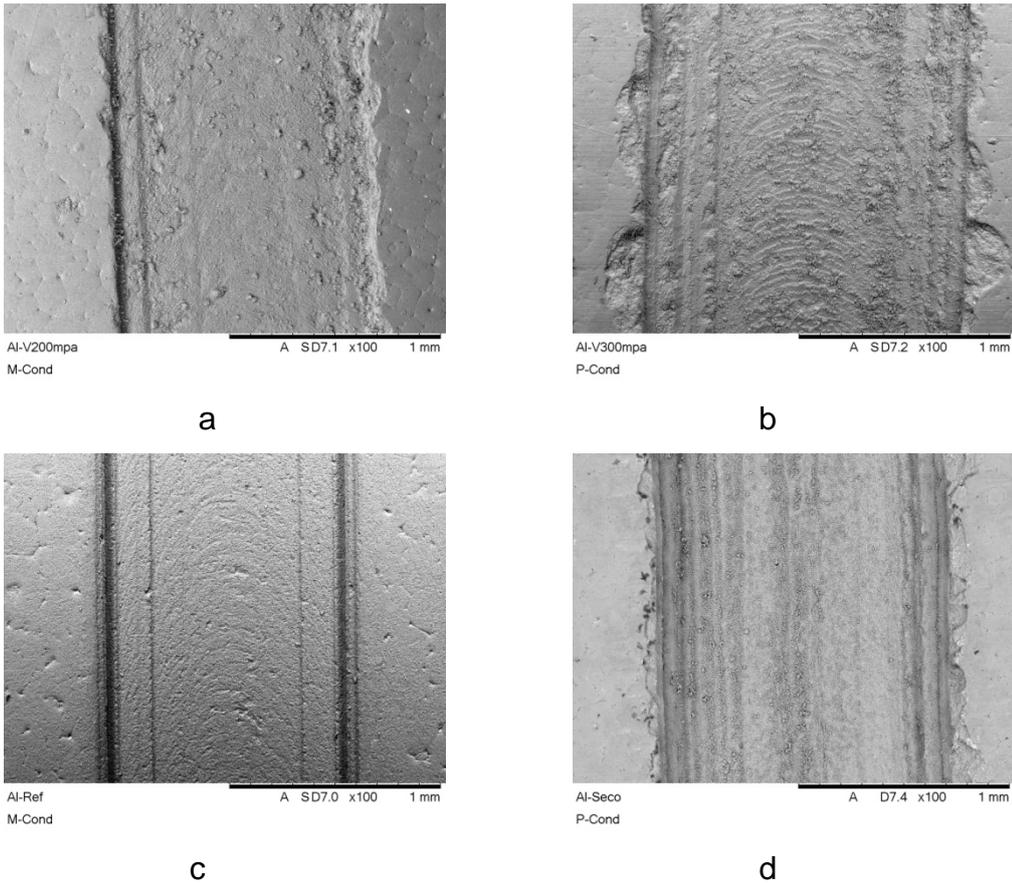


Figura 4 – Micrografias das amostras usadas sob as melhores e piores condições de usinagem para a alumina a verde (a e b), e para a alumina parcialmente sinterizada (c e d).

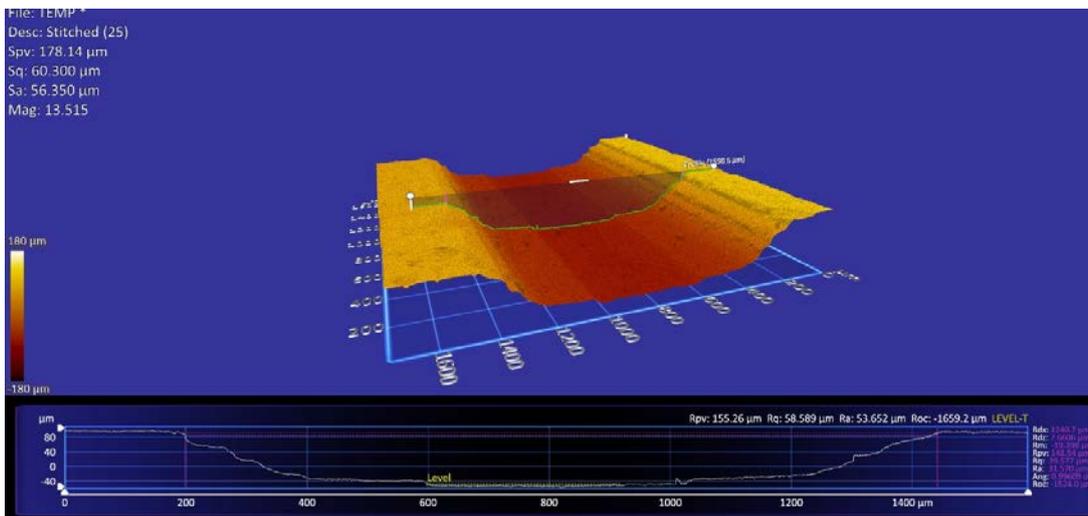


Figura 5 – Figura obtida no perfilômetro óptico com a análise da superfície de uma alumina parcialmente sinterizada e usada.

Conclusões

A utilização de uma fresadora simples e de baixo custo, controlada por CNC, possibilitou que se obtivesse bons resultados de rugosidade na usinagem de alumina parcialmente sinterizada.

O método Taguchi de design de experimentos e a análise de resultados se mostraram adequados para a otimização do processo de usinagem de cerâmicas não sinterizadas.

Com parâmetros de processo otimizados, é possível obter corpos com alto acabamento superficial e alta retenção de borda.

A sinterização parcial da alumina permite a obtenção de melhores condições de usinagem

A refrigeração durante a usinagem proporcionou significativas melhorias na usinagem da alumina parcialmente sinterizada.

Referências Bibliográficas

1 – R. Janssen, S. Scheppokat, and N. Claussen, Tailor-made ceramic-based components - Advantages by reactive processing and advanced shaping techniques, *Journal of the European Ceramic Society*, 28 (2008) 1369-1379.

2- V. K. Pujari, A. Vartabedian, and W. T. Collins, Advanced machining technology for gas turbine and heat engine components, *Industrial Ceramics*, 30 (2010) 129-132.

3 - S. Mohanty, A. P. Rameshbabu, and S. Dhara, Net shape forming of green alumina via CNC machining using diamond embedded tool, *Ceramics International*, 39 (2013) 8985-8993.

4 - A. Pfrengle, J. R. Binder, H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, T. Gietzelt, and J. Hausselt, Green Machining of Net Shape Ceramics, *Proceedings of the 10th International Conference of the European Ceramic Society*. eds., J. G. Heinrich and C. G. Aneziris. Go'ller Verlag GmbH, Baden-Baden, Germany, 487–492, 2008.

5- A. Margarido, B. M. Purquerio, C. R. Foschini, and C. A. Fortulan, Influence of the green-machining parameters on the mechanical properties of alumina rods, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88 (2017) 3475-3484.

6 – B. Denkena, S. Busemann, L. Gottwik, T. Grove, A. Wippermann; Material Removal Mechanisms in Grinding of Mixed Oxide Ceramics. 3rd CIRP Conference on BioManufacturing, *Procedia CIRP* 65 (2017) 70 – 77

7 - M. Desfontaines, Y. Jorand, M. Gonon, and G. Fantozzi, Characterisation of the green machinability of AlN powder compacts, *Journal of the European Ceramic Society*, 25 (2005) 781-791.

8 - A. Pfrengle, J. R. Binder, H. J. Ritzhaupt-Kleissl, J. Hausselt, C. Muller, and T. Gietzelt, Optimizing Net-Shape Ceramics for Green Machining, International Journal of Applied Ceramic Technology, 7 (2010) 189-196.

9 - C. C. Degnan, A. R. Kennedy, and P. H. Shipway, Relationship between physical structure and machinability of green compacts, Powder Metallurgy, 50 (2007) 14-20.

10 - N. Kondo, H. Hyuga, and H. Kita, Effect of green machining on strength of silicon nitride with as-sintered surface, Journal of the Ceramic Society of Japan, 115 (2007) 504-506.

Abstract

The machining process of sintered ceramics is a slow and expensive step in the manufacture of parts with complex geometries due to the high hardness and wear resistance of the material. An alternative that has been increasingly used to make pieces with complex geometry is the machining of bodies in the green or partially sintered state. The machining process of these parts is strongly influenced by the characteristics of the material (such as mechanical strength, hardness, apparent density), characteristics of the machining tool (material, tip geometry, grain size) and machine operating parameters (such as feed, rotation and depth of cut, lubrication). In this work, the machining conditions of isostatically pressed, green or partially sintered (1000 to 1200 °C) were studied, using a simple and inexpensive CNC milling machine. Parameters such as rotation, tool geometry and grain size, feed rate, shear depth and lubrication were varied using the Taguchi method in order to reduce the number of experiments. The machining quality and the influence of the studied parameters were evaluated by the roughness of the machined surface and the integrity of the edges. As expected, the benefit of cooling on tool wear and also on the green and sintered surface finish. It was possible to reach a set of conditions related to the characteristics of the ceramic bodies and to the machining parameters that allowed to obtain surfaces with low roughness ($R_a < 0.7 \mu\text{m}$), free of cracks and without edge chipping.

Key words: green machining, alumina, processing, design of experiments, Taguchi