



PROCESSOS DE USINAGEM EM CERÂMICAS SINTERIZADAS, EM VERDE E AVANÇADAS (MACOR®): UMA REVISÃO.

Marina Reis de Andrade¹, Valter Estevão Beal¹.

¹Av. Orlando Gomes, 1845 – Piatã, 41650-010; Salvador/Bahia;
marina.andrade@fbter.org.br

Resumo: Este trabalho relata o avanço tecnológico do estado físico de materiais cerâmicos, que sempre foram mais utilizados em seu estado sinterizado ou em verde e que hoje vem sendo substituídos por materiais cerâmicos avançados que são compostos por elementos que, juntos, melhoram suas propriedades mecânicas, físicas, morfológicas, químicas, óticas e eletrônicas, aumentando as possibilidades de processamento (usinagem) e aplicação. Foca-se na vitrocerâmica avançada Macor® fabricada pela *Corning* fazendo um comparativo de propriedades e exemplificando sua aplicação por meio de estudos existentes.

Palavras-Chave: materiais cerâmicos; cerâmicas avançadas; vitrocerâmica Macor®; revisão bibliográfica.

MACHINING PROCESSES IN SINTERED CERAMICS, GREEN AND ADVANCED (MACOR®): A REVIEW.

Abstract: This paper reports the technological advancement of the physical state of ceramic materials, which have always been more used in their sintered or green state and which today is being replaced by advanced ceramic materials that are composed of elements that together improve their mechanical and physical properties, morphological, chemical, optical and electronic, increasing the possibilities of processing (machining) and application. It focuses on advanced ceramic manufactured by Corning Macor® making a comparative properties and exemplifying implementation through existing studies.

Keywords: ceramic materials; advanced ceramics; Macor® glass ceramic; bibliographic review.



1. INTRODUÇÃO

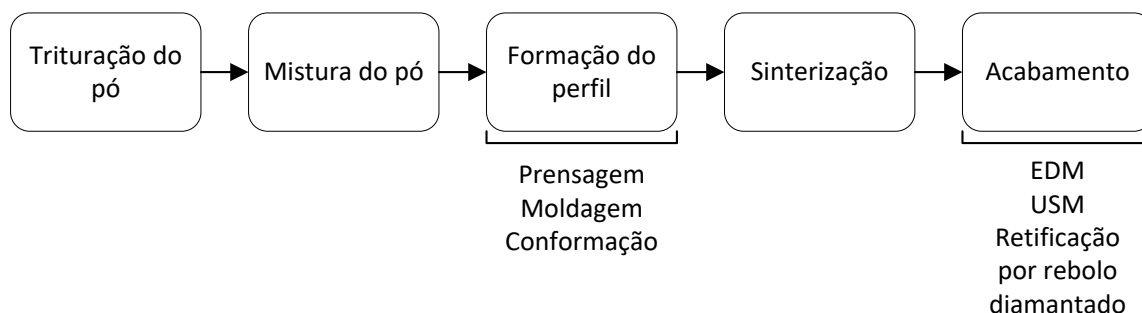
O processo de usinagem é a transformação da matéria prima de modo que haja a retirada de material que conseqüentemente gera cavacos, pode-se concluir que todo processo na qual é retirado uma parcela de material seja ela por cisalhamento ou na forma de cavaco é considerada usinagem [1].

Materiais cerâmicos reúnem um conjunto 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, que viabilizam a sua utilização em uma ampla variedade de aplicações: estruturais, elétricas, químicas, nucleares, térmicas, microscópicas [2].

Devido ao continuo progresso no desenvolvimento de novos materiais, a importância das cerâmicas não é apenas em relação à substituição de outros materiais, mas também para permitir que novos produtos sejam desenvolvidos. No entanto, independentemente das suas excelentes propriedades estruturais, a cerâmica não é amplamente utilizado na indústria como deveriam e poderiam ser pois apresentam características negativas que limitam sua aplicação, especialmente pela baixa tenacidade à fratura, responsável pela baixa resistência ao impacto e uma mínima taxa de deformação plástica além de outros problemas relacionados como a reprodutibilidade, confiabilidade e alto custo de fabricação que precisam ser resolvidos, especialmente em peças de formas mais complexas e muito pequenas [3].

Os processos de usinagem para moldar peças cerâmicas são geralmente utilizados com o objetivo de obter peças com baixo volume, alta precisão, fabricação de peças com formas geométricas complexas que são mais caras de serem fabricadas por métodos com baixo rendimento, como por exemplo, fundição ou moldagem por injeção. No diagrama abaixo (Figura 1) é exposta a divisão do processo de fabricação de uma peça cerâmica comum [4].

Figura 1: etapas de fabricação de uma peça cerâmica [4].





2. METODOLOGIA

Foi realizada uma revisão bibliográfica com objetivo de encontrar artigos científicos, dissertações e teses que abordem a temática deste artigo. As palavras-chave apresentadas na Tabela 1 foram utilizadas na pesquisa. Os conectores “e”, “ou”, “and” e “or” foram utilizados para facilitar o filtro dos resultados na pesquisa.

Tabela 1: Palavras-chave utilizadas na pesquisa de anterioridade referente a temática deste artigo.

Palavras-chave	
Português	Inglês
Materiais cerâmicos	Ceramic materials
Usinagem de materiais cerâmicos	Machining of ceramic materials
Conformação de materiais cerâmicos	Conformation of ceramic materials
Cerâmica verde	Green ceramic
Cerâmica sinterizada	Sintered ceramics
Usinagem avançada	Advanced machining
Processos avançados de usinagem	Advanced Machining Processes
Cerâmicas avançadas	Advanced ceramics
Usinagem de cerâmicas avançadas	Advanced Ceramic Machining
Parâmetros de usinagem	Machining Parameters
Métodos avançados de usinagem	Advanced Machining Methods

Abaixo (Tabela 2) são apresentadas as bases principais de busca dos artigos utilizados neste trabalho.

Tabela 2: Bases de busca dos artigos.

Periódico	Classificação	Fator de impacto
Dental Materials	A1	4.440



Materials science & engineering. A, structural materials	A1	4.081
Applied Mechanics and Materials	C	0.37
Innovations Implant Journal	B4	-
Procedia CIRP	NP	-
Coating on Glass	-	-

Além disso, os artigos encontrados servirão de base para discussão comparativa entre os métodos de usinagem existentes para os variados tipos de materiais cerâmicos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para conseguir a redução do tempo de produção, geralmente, conforma-se o pó cerâmico em formatos e dimensões próximos ao produto final, e por meio da usinagem as imperfeições são corrigidas e chega-se as dimensões solicitadas para o produto final [5]. Dessa forma, entende-se que cumprir com as tolerâncias dimensionais solicitadas é um requisito comum e básico à fabricação de peças cerâmicas, e este processo pode estar presente nas diferentes etapas de fabricação após a sinterização (queima total), após sua queima parcial ou em seu estado verde (com ou sem aglomerantes) [4].

A usinagem de corpos cerâmicos pode ocorrer em três diferentes situações: nas peças já sinterizadas, nas peças parcialmente sinterizadas e nas peças a verde, conformadas e secas [1].

3.1. Métodos usuais de usinagem em material cerâmico

3.1.1. Usinagem de cerâmica sinterizada

A usinagem das cerâmicas em seu estado sinterizado, geralmente se mostra inviável para uma vasta gama de processos devido a sua alta dureza e baixa tenacidade à fratura, esse material apresenta um percentual de deformação plástica muito pequeno, podendo considerar também outros pontos negativos como a lentidão no processo de remoção de material e os altos custos de processo envolvidos [1].

No processo de sinterização a cerâmica é queimada e a peça adquire propriedades finas quando submetidas a essas temperaturas elevadas. Durante todo esse processo de queima ocorre uma série de transformações em função dos componentes da massa cerâmica, que são característicos do tipo de material



cerâmicos e quais elementos o compõem, da temperatura de queima e da aplicação final [2].

Para peças que passam por esse tratamento, a usinagem utilizando ferramentas de corte de diamante são as mais utilizadas, já que por meio destas é possível que este material frágil atinja as dimensões desejadas e tenha um bom acabamento superficial, no entanto, um ponto negativo desse tipo de processo é o alto custo da ferramenta. Além disso, durante o processo, a peça sofre danos por conta da sua característica frágil, como trincas superficiais ou subsuperficiais, resultando na perda de resistência mecânica da peça [2-4].

Em peças sinterizadas, verifica-se diferentes tipos de danos 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. Além disso, a profundidade de corte na remoção de material também influencia na formação de micro trincas, recomendando-se taxas menores de remoção de material [2].

3.1.2 Usinagem de cerâmicas no estado verde

Este processo é alternativo ao anterior explicado, principalmente por diminuir o custo associado ao processo de fabricação comparado com o custo da peça sinterizada. As cerâmicas em seu estado verde são mais delicadas e não apresentam resistência suficiente para aguentarem um processo de usinagem, desta forma, reforça-se o material a verde com ligantes poliméricos através de técnicas de impregnação ou durante as etapas de moagem e mistura do processo de obtenção do material, conferindo uma boa usinabilidade da peça além de diminuir os custos de operação [2-3].

Formatos geométricos mais complexos e mínimas tolerâncias dimensionais nem sempre são conseguidas através de moldes. Essas dimensões são obtidas pela usinagem da superfície e outras operações de acabamento posteriores a densificação (eliminação de poros e aumento da resistência mecânica), exigindo uma operação de usinagem com ferramenta de diamante. Para minimizar a usinagem pós sinterização (material frágil), usina-se a massa cerâmica conformada ("blank"), levando em consideração uma contração de aproximadamente 10% do volume na densificação, obtendo resultados bem próximos aos desejados de geometria e tolerâncias dimensionais [3-4].

O processo de usinagem a verde agrega recursos aos métodos de conformação que, sozinhos, não são capazes de produzir geometrias complexas de compactados. Além disso, neste estado o processo de usinagem requer o uso de ferramentas com geometrias definidas com altas taxas de remoção de material, diferentemente do processo de usinagem na cerâmica sinterizada [3].

3.2. Cerâmicas avançadas



Com o objetivo principal de atender as demandas e acompanhar os avanços e necessidades de novas tecnologias, as cerâmicas avançadas foram desenvolvidas para substituir as comumente utilizadas e suprir as demandas existentes. Estes materiais avançados são produzidos a partir de matérias-primas de elevada pureza como carbetos, óxidos, boretos, nitretos, oxinitretos, entre outros, resultando em materiais com características superiores e diferenciadas como resistência a altas temperaturas, resistências a uma elevada gama de resíduos químicos e corrosivos e elevada resistência mecânica [6].

Esses materiais vêm sendo amplamente utilizados nas indústrias automobilística e aeroespacial moderna, energia e meio ambiente, engenharia mecânica, em aplicações eletrônicas e médicas. A razão é que esses materiais apresentam inércia química superior, propriedades óticas, elétricas e magnéticas, resistência à corrosão e oxidação, propriedades mecânicas como alta resistência ao desgaste e dureza e alta resistência e rigidez em temperaturas elevadas [7].

Cerâmicas a base de zircônia têm sido estudadas e utilizadas em um grande número de aplicações tecnológicas, uma delas é a implantodontia, uma vez que o dióxido de zircônia vem substituindo os metais em implantes dentários por conferir boas características físicas como elevada dureza e resistências a flexão, além da sua estabilidade química e biocompatibilidade [8].

Durante esta pesquisa, foi encontrada a empresa *Corning* que fabrica materiais cerâmicos avançados para diversas aplicações, a *Macor®* é uma cerâmica de vidro avançada usinável com propriedades mecânicas, térmicas e ópticas diferenciadas. De acordo com o *datasheet* disponibilizado pela empresa no seu próprio site, este material possui a versatilidade de um polímero e o alto desempenho que proporciona a usinagem com metais macios ou comuns. Além de possuir uma porosidade igual a 0%, ele apresenta propriedades mecânicas muito próximas a de alguns metais como *Inox 304* e *Alumínio 6061* e é soldável a uma ampla gama de materiais [9].

A *Macor®* é composta por 44% de sílica, 16% de óxido de alumínio, 8% de trióxido de boro, 16% de óxido de magnésio, 10% de óxido de potássio e 6% de flúor [10].

Os processos de usinagem que a *Macor®* pode ser submetida também são explicados num guia específico também disponível no site da empresa, apresentando o tipo de processo de usinagem e quais ferramentas são indicadas, além de especificar outros parâmetros importantes (velocidade de corte, profundidade de corte, taxa de alimentação) para determinados processos (torneamento, perfuração, fresamento, rosqueamento) além de tutoriais básicos para polimento [11].

Diversas pesquisas utilizando a *Macor®* de diversas formas diferentes para uma vasta gama de aplicações foram encontrados. Os avanços tecnológicos referentes a união de cerâmica-cerâmica ou cerâmica metal vem se desenvolvendo tecnologicamente nos últimos anos. Titânio (99,6% em peso) e *Macor®* foram triturados até atingir determinado diâmetro granular e unidos com uma folha de liga de brasagem por aquecimento, formando uma interface de múltiplas camadas (sete ao total), isenta de furos e fissuras. Concluiu-se que estes materiais podem ser unidos via brasagem, produzindo camadas livres de poros com elevada dureza e melhor resistência ao cisalhamento [12].



Outro estudo interessante utilizou placas do material vitrocerâmico usinável Macor® e as cimentou com filmes finos de dois tipos de cimento (fosfato de zinco/composto de resina). Os resultados apresentaram um aumento em 75% no percentual de resistência a fratura utilizando o filme de cimento resinoso com relação ao cimento de fosfato, atribuído esse resultado positivo à colagem do filme de cimento na estrutura da placa vitrocerâmica, principalmente [13].

Estes foram apenas alguns dos muitos estudos existentes utilizando essa vitrocerâmica usinável, que apresenta excelentes propriedades mecânicas, óticas, térmicas e eletrônicas, tendo um leque muito vasto de aplicação. Durante a pesquisa, foram encontrados diversos estudos que tentavam fabricar uma vitrocerâmica com propriedades próximas a da Macor® para viabilização do uso, já que é um material importado e caro. Outros estudos estão muito mais voltados a possibilidades de biocompatibilidade desse material, principalmente na ortodontia. Além disso, a análise, de acordo com a aplicação, do melhor tipo de usinagem e ferramenta de corte a serem utilizadas para obtenção das tolerâncias dimensionais desejadas também é muito estudado.

4. CONCLUSÃO

Existem 3 tipos principais de estados físicos dos materiais cerâmicos que foram e ainda são muito utilizados tanto no ramo da metal-mecânica quanto em projetos eletrônicos, automotivos, odontológicos, etc. No entanto, a Macor é um material diferenciado e que possui uma gama muito mais extensiva de possibilidades, tanto para processos de fabricação, quanto para aplicações. Existem muitos estudos utilizando esse material, entretanto, a tecnologia nunca para de avançar, e pesquisas voltadas para aplicação desse material sob tolerâncias geométricas na casa dos milésimos de milímetros ainda são poucas, requerendo maiores avanços em pesquisas e testes por parte da sociedade científica.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CODEMGE, a EMBRAPII e ao SENAI CIMATEC pelo apoio financeiro e de infraestrutura.

5. REFERÊNCIAS

- [1] SILVA, A. A. et al. **Otimização do processo de usinagem de componentes de alumina a verde e parcialmente sinterizados em fresadora CNC**. 23º CBECIMat, Foz do Iguaçu – PR, 2018.
- [2] BUKVIC, Gill. **Usinagem a verde voltada à melhoria da distorção e acabamento superficial de cerâmicas sinterizadas**. Dissertação de Mestrado. UNESP, Bauru – SP, 2011.



- [3] MARGARIDO, A. **Estudo da influência da força de corte da usinagem a verde nas propriedades mecânicas de cerâmicas sinterizadas**. Dissertação de Mestrado. USP, São Carlos – SP, 2011.
- [4] EL-WARDANY, T. et al. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. Vol. 58, p.109–112, 2009.
- [5] FIOCCHI, A. A. **Ciência e tecnologia da manufatura de ultraprecisão de cerâmicas avançadas: Lapidoretificação U_d de superfícies planas de zircônia tetragonal policristalina estabilizada com ítria**. Tese de Doutorado. USP, São Carlos – SP, 2014.
- [6] Macea Cerâmicas Avançadas. **Cerâmica avançada: sua resistência e qualidade**. Publicado em 06 de janeiro de 2017. Disponível em: <https://www.macea.com.br/noticias/ceramica-avancada-sua-resistencia-e-qualidade>
- [7] GORIN, A. et al. **Applied Mechanics and Materials**. Vol. 624, p. 42-47, 2014.
- [8] CIUCCIO, R. L. et al. **Innov. Implant. J., Biomater. Esthet**. Vol.5, n.1, 2010.
- [9] CORNING. **Macor® Cerâmica de vidro usinável para aplicações industriais**. Disponível em: <https://www.corning.com/media/worldwide/csm/documents/f180372fcfe941c4a404b1660b0451f0.pdf>
- [10] PULKER, H. K. **Coating on Glass**. 2ª ed. Elsevier Science B.V. Amsterdam, 1999.
- [11] CORNING. **MACOR® Machinable Glass Ceramic for Industrial Applications – Machinig Guidance**. Disponível em: <https://www.corning.com/media/worldwide/csm/documents/a273d3bb4f134c31be5343db861eb3ba.pdf>
- [12] GUEDES, A. et al. **Materials Science and Engineering**. Vol. 301, pp. 118-124, 2001.
- [13] SCHERRER, S. S. et al. **Dental Materials**. Vol. 10, p. 172-177, 1994.