

Seleção do processo de fabricação de produtos cerâmicos considerando dimensões, geometria e tolerâncias

O processo de fabricação de produtos cerâmicos policristalinos, normalmente, se faz a partir de matérias-primas particuladas, na forma de pós, que são submetidas a processos de mistura, conformação, secagem, usinagem e sinterização, também conhecida como queima. Ao conjunto dessas operações, aliado às etapas de formulação e seleção de matérias-primas, dá-se o nome de processamento de materiais cerâmicos.

O processamento de cerâmicas deve ser visto como uma série de etapas integradas e inter-dependentes, que envolve a fabricação de vários produtos intermediários.

O fluxograma da figura 1 ilustra as principais etapas envolvidas na produção de peças baseadas em cerâmicas cristalinas, foco desse texto. Esse é um fluxograma genérico, que apresenta variações em função do tipo de produto fabricado.

Figura 1 –

Grande parte dos produtos cerâmicos produzidos industrialmente é conformada por prensagem uniaxial. Nessa técnica, um molde, produzido normalmente em aço ou metal duro (WC-Co), é preenchido com um pó, que é submetido à aplicação de pressão exercida por um punção superior, processo conhecido por prensagem uniaxial de ação simples, ou pela ação simultânea de um punção superior e um inferior, prensagem uniaxial de ação dupla. Uma variante desse processo é a prensagem com camisa flutuante, onde a camisa do molde também se movimenta.¹

Normalmente, as pressões envolvidas na prensagem uniaxial variam entre 70 e 200 MPa e são produzidas de 10 a 150 peças por minuto². A etapa de preenchimento do molde é crucial para o sucesso do processo de conformação. O pó deve ter fluidez adequada para se ter um bom preenchimento. Para tal, pós finos são indesejáveis, o que exige a granulação controlados dos mesmos, feita pelo processo de “*spray-drying*”. Os grânulos obtidos são destruídos na etapa de compactação.

Apesar de ser um processo que permite automação de apresentar alta produtividade, não é versátil no que diz respeito à geometria e dimensões das peças.

O principal problema associado ao processo de prensagem uniaxial está relacionado a gradientes de densidade e compacidade ao longo da peça a verde (antes da queima), o que leva à limitação da razão entre a altura e a área da secção transversal. Essa razão, para peças pequenas, deve ser inferior a 3, valor ainda reduzido para peças com diâmetros superiores a 10 cm.^{3,4,5}

Além disso, essa técnica não permite a produção de peças com relevos superficiais. A exigência desses relevos requer etapas de usinagem, o que eleva bastante os custos de fabricação, dado que a etapa de usinagem é responsável por até 80% dos custos envolvidos na fabricação de produtos cerâmicos.⁶

Como a prensagem uniaxial não exige altos teores de umidade, a retração da peça em etapas posteriores, como a secagem e sinterização, está entre 10 e 20%. Em termos de controle dimensional, deve-se garantir uma uniformidade das características da matéria-prima para se obter reprodutibilidade das peças prensadas. Isso é mais importante na produção de peças a partir de matérias-primas naturais, que apresentam variações em suas composições químicas e perda ao fogo. Para minimizar os problemas decorrentes dessas variações, devem ser feitos ajustes constantes da formulação.

04 jan

As limitações geométricas impostas pela prensagem uniaxial levaram ao desenvolvimento da técnica de prensagem isostática a frio. Nessa técnica, um molde, fabricado em um polímero termoplástico, acondiciona a peça cerâmica e é submerso em um fluido compressível, responsável pela transmissão de pressão à peça. Essa técnica, além de permitir a produção de peças com geometrias mais complexas, minimiza os efeitos de gradientes de pressão ao longo da peça e seus efeitos deletérios de retração diferencial, o que pode induzir o empenamento e fratura de peças obtidas por prensagem.^{9,10}

Outra técnica bastante utilizada na conformação de peças cerâmicas é a colagem de barbotina. Nessa técnica, uma suspensão cerâmica é vertida no interior de um molde poroso, geralmente gesso e podem ser utilizados moldes poliméricos com porosidade controlada. Essa técnica apresenta grande versatilidade na fabricação de peças complexas, inviáveis de serem fabricadas por prensagem.^{1,2}

O processo de colagem de barbotina é empregada normalmente, na produção de peças com até 30 cm de diâmetro e 1 m de comprimento. Após a conversão da suspensão, chamada de barbotina, no molde, o líquido (geralmente a água) é “sugado” para o interior de molde, por capilaridade. Embora seja empregada na produção de

peças maciças, peças ocas são bastante populares na obtenção de peças por colagem de barbotina.^{11,12}

Por ser uma técnica de conformação fluida, envolvendo suspensões cerâmicas, a estabilidade das mesmas é o parâmetro de processo que exige maior controle durante o processo. A reologia da suspensão é fator preponderante nesse processo. As suspensões devem ser bem defloculadas e homogêneas, com o intuito de se evitar a sedimentação de partículas e formação de aglomerados, que podem causar o aparecimento de regiões com densidades distintas na peça a verde, o que inviabiliza o controle dimensional e geométrico das peças durante a sinterização.¹³

Para se garantir propriedades reológicas ótimas da suspensão, faz-se necessário otimizar a concentração de sólidos na suspensão e distribuição do tamanho de partículas, assim como a homogeneização dos mesmos.¹³

Além disso, a dispersão das suspensões é feita com a adição de aditivos, como polieletrólitos orgânicos. A concentração destes deve ser limitada, dado que a remoção de polímeros orgânicos empregados na estabilização estérica e/ou eletroestática causa retração e tem implicações diretas no valor e taxa de retração linear e volumétrica das peças.

O emprego da técnica de colagem de barbotina é vantajoso no que diz respeito ao acabamento superficial. Os defeitos de prensagem causam problemas dimensionais e de tolerâncias. Além disso, peças conformadas por colagem apresentam níveis de rugosidade superficial inferiores às de peças prensadas. Outra vantagem competitiva do processo de colagem de barbotina está relacionada ao fato de que defeitos de prensagem que ocorrem na retirada da peça do molde e durante a eliminação da carga, na forma de laminações e trincas nas bordas superiores, não aparecem em peças coladas.

Para aumentar a produtividade do processo de colagem, desenvolveu-se a técnica de colagem sob pressão, com aplicação de pressão no fluido e/ou aplicação simultânea de vácuo no molde¹⁴. Embora interessante do ponto de vista do aumento da velocidade de formação da parede (chamada popularmente de “torta”), há problemas com o aparecimento de bolhas durante a retirada da pressão, o que compromete o controle dimensional, dado que a presença dessas bolhas provoca gradientes de retração das peças durante a sinterização. Esse fenômeno também causa problemas de reprodutibilidade na produção de pequenos componentes em aplicações de cerâmicas avançadas.

A técnica de colagem de fitas, que também se utiliza de suspensões cerâmicas, é tipicamente empregada na fabricação de peças de alturas reduzidas, entre 100 e 1000 μm ¹⁵. É bastante usada na fabricação de cerâmicas eletrônicas, como substratos e capacitores multi-camadas. Admite a fabricação de peças com altura reduzida, com dimensões reduzidas e tolerâncias de grande precisão.

Outro processo de conformação utilizado é a extrusão. Nessa técnica, uma massa plástica, contendo o pó cerâmico e aditivos, é misturada, submetida à ação de grandes tensões de cisalhamento e forçada a passar por um bico cônico, após uma etapa de desaeração.

A extrusão é empregada na produção de peças com secção transversal constante, com diâmetros de até 30 cm e comprimentos variados, podendo ultrapassar 1 m. A plasticidade da massa é a principal variável de controle. Há um valor ótimo de plasticidade, onde o gradiente de fluxo da massa é minimizado e conseqüentemente, o problema associado de aparecimento de laminações. Essas laminações internas são as grandes responsáveis por variações geométricas e dimensões entre peças extrudadas de um mesmo lote de fabricação.

Uma outra técnica que envolve massas altamente plásticas é a moldagem por injeção. É uma técnica de relativa versatilidade em relação à geometria da peça, sendo bastante comuns peças com diâmetros de até 6 cm, sendo possível a manufatura de peças com até 20 cm.

A injeção de peças cerâmicas faz uso de um grande volume de polímeros orgânicos, o que exige rigor nas etapas subsequentes, devido às altas retrações que ocorrem durante a remoção desses materiais orgânicos.

A grande quantidade de polímeros a ser removida limita sensivelmente a densidade da peça a verde (após secagem), o que causa problemas na remoção do molde e a sinterabilidade das peças injetadas.

O uso de pirólise pode minimizar os efeitos indesejáveis da injeção, pois pode reduzir o volume de aditivos orgânicos e consequentemente, diminuição da porosidade.

Outro problema associado à injeção de peças cerâmicas refere-se ao alinhamento de partículas anisotrópicas ao longo das peças injetadas. Esse alinhamento pode causar retração diferencial, o que causa distorções dimensionais da peça. Além disso, há um problema adicional, associado ao caráter tubular dos poros, que pode comprometer a densificação das peças durante a queima final.

Os processos de conformação descritos são os mais empregados industrialmente na produção de peças cerâmicas. Essas peças, no geral, são submetidas a um tratamento térmico posterior, denominado de sinterização, onde ocorrem 2 fenômenos: densificação e crescimento de grãos. Ambos são concorrentes e dependem da densidade da peça a verde, assim como morfologia da porosidade aparente, que pode ser fechada ou aberta. Quanto mais densa e homogênea a peça a verde, menores os problemas de controle dimensional e geométrico, assim como maior a reprodutibilidade do processo de sinterização, ou seja, problemas com tolerâncias são eliminados.

Para fabricação de peças com geometrias intrincadas e altos níveis de exigência dimensional, técnicas de usinagem devem ser empregadas. Essas técnicas elevam consideravelmente o custo das peças, porém podem eliminar regiões defeituosas ou com gradientes de densidade. O sucesso das etapas de usinagem e acabamento superficial depende da velocidade de remoção do material, da interação da peça com as partículas abrasivas que constituem o rebolo e propriedades da peça retificada, como o módulo elástico E , dureza e tenacidade.

A retificação abrasiva pode induzir ao aparecimento de trincas superficiais, paralelas e/ou transversais à direção de usinagem, arriscando a integridade física das peças usinadas. Esses problemas podem ser minimizados com o emprego de usinagem a laser.

Como alternativa na produção de peças com geometrias complexas, tem sido empregado um grande esforço no desenvolvimento de técnicas capazes de produzir artefatos com geometrias e dimensões bem próximas à desejada, técnicas chamadas de “*near-net shaping*”, como a técnica de *gel casting* e sinterização a laser. Embora ainda sejam técnicas de custos elevados, há uma tendência em se substituir processos de fabricação que incluem a usinagem como uma de suas etapas, por essas novas técnicas, em função da grande versatilidade dessas em produzir peças com geometrias variadas, assim como de dimensões difíceis de produzir com técnicas de conformação tradicionais. Há que se considerar os altos custos envolvidos na usinagem de peças cerâmicas.

Uma outra vantagem da técnica de sinterização a laser é o fato de que a conformação e sinterização da peça são realizadas simultaneamente e de forma automatizada.

REFERÊNCIAS

1. Reed, J.S., *Principles of Ceramics Processing*, 2nd Edition, Wiley-Interscience, 1995.
2. Rice, R.W., *Ceramic Fabrication Technology*, Marcel Dekker, New York, 2004.
3. Van Groenou, A. B., *Compaction of Ceramic Powders*, PWD. Tech. 28: 221-228, 1981.
4. Thompson, R.A., Am. Cer. Soc. Bul., 1981, 160(2), 237-243.
5. Lannutti, J.J. , Deis, T.A., Kong, C.M., Phillips, D.H, Am. Cer. Soc. Bul. , 1997, 76(1), 53-58.
6. Deis, T.A. Lannutti., J.J., *J. Am. Cer. Soc.*, 1998, 81(5), 1237-1247.
7. Grinberg, Ya. M. e Degtyareva, É. V., *Refr. Ind. Cer.*, 1982, Volume 23, Numbers 9-10, Pages 535-540.
8. Sagawa M. e Nagata, H., *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS* 1993. VOL. 29. NO. 6. NOVEMBER
9. A. Kondratyuk, B. P. Romanov, N. O. Romanova, Tomsk Polytechnic University 30 Lenina Ave., Tomsk, 634034, Russia, Science and Technology, 2000. KORUS 2000. Proceedings. The 4th Korea-Russia International Symposium on 2000 volume: 3, pages: 305-306.
10. Colagem. R.R. Rowlands. A review of the slip casting process. Am. Cer. Soc. Bui. 45(1):16-19, 1966.
11. Colagem H. Taguchi, Y. Takahashi, H. Miyamoto. Slip casting of partially stabilized zirconia. Am. Cer. Soc. Bui. 64(2):325, 1985.
12. Colagem 62. Z. Zhang, L. Hu, M. Fang. Slip casting nanometer-sized powders. Am. Cer. Soc Bui. 75(12):71-74, 1996.
13. Livro do Polim
14. A. Salomoni, I. Stamenkovic. Pressure casting offers possibilities for technical ceramics, Am. Cer. Soc. Bui. 79(11):49-53, 2000.
15. T.P. Hyatt. Electronics: Tape casting, roll compaction. Am. Cer. Soc. Bui. 74(10):56-59, 1995.

- Halloran, J. W., Freeform fabrication of ceramics. *Br. Ceram. Proc.*, 1999, **59**, 17–28.
2. Cawley, J. D., Solid freeform fabrication of ceramics. *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, 1999, **4**, 483–489.
3. Lewis, J. A., Smay, J. E., Stuecker, J. and Cesarano III, J., Direct ink writing of three-dimensional ceramic structures. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2006, **89**, 3599–3609.
4. Brady, G. A. and Halloran, J.W., Stereolithography of ceramic suspensions. *Rapid Prototyping J.*, 1997, **3**, 61–65.
5. Moon, J., Grau, J. E., Knezevic, V., Cima, M. J. and Sachs, E. M., Ink-jet printing of binders for ceramic components. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2002, **85**, 755–762.