

Sinterização de cerâmicas em microondas. Parte II: Sinterização de varistores ZnO-CuO, ferrita e porcelanas

(Microwave sintering of ceramics. Part II: Sintering of ZnO-CuO varistors, ferrite and porcelain bodies)

R. R. Menezes, P. M. Souto, R. H. G. A. Kiminami

Laboratório de Desenvolvimento e Processamento de Materiais em Microondas - LaDProM

Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de S. Carlos

Rod. Washington Luiz, km 235, S. Carlos, SP 13565-905

rrmboca@iris.ufscar.br, ruth@power.ufscar.br

Resumo

O processamento de materiais baseado no aquecimento por meio de energia de microondas vem ganhando a cada dia mais destaque e importância em várias aplicações, em virtude de uma série de vantagens em potenciais frente aos métodos convencionais de aquecimento. Assim, esse trabalho tem por objetivo a utilização da sinterização híbrida com microondas na queima rápida de materiais cerâmicos. Foram estudados materiais que requerem baixas temperaturas para densificação. Foram sinterizados materiais com elevada perda dielétrica, varistores ZnO-CuO e ferrita, e materiais que apresentam mudanças bruscas no comportamento dielétrico com o aumento de temperatura, com pequena perda dielétrica na temperatura ambiente, mas perda elevada em altas temperaturas, porcelanas. Foi utilizado material susceptor como agente auxiliar de aquecimento. Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que o sistema de sinterização desenvolvido pode ser utilizado com eficiência na sinterização rápida e uniforme de todos os materiais estudados, independentemente das características particulares de sinterização em microondas desses materiais, sendo possível o uso de tempos de processamento semelhantes ou inferiores aos observados na literatura abordando o aquecimento rápido com microondas.

Palavras-chave: microondas, sinterização, cerâmicas.

Abstract

The use of microwave energy to process materials has gained increasing importance in many industrial applications due to its potential advantages over conventional heating methods. The work reported here consisted of fast hybrid microwave sintering of ceramic materials requiring low sintering temperatures for densification. The sintered materials showing high dielectric losses were ZnO-CuO varistors and ferrite, while those presenting sharp increases in dielectric loss with rising temperatures, i.e., low dielectric loss at ambient temperature and high loss at elevated temperatures, were porcelain bodies. A susceptor was used as an auxiliary heating agent. The results indicate that the sintering system developed here can be used efficiently for the rapid, uniform sintering of all the ceramics in question. The microwave sintering involved similar and shorter times than those reported in the literature for fast microwave sintering of ceramics.

Keywords: microwaves, sintering, ceramics.

INTRODUÇÃO

Processos baseados na utilização da energia de microondas encontram várias aplicações industriais. O uso das microondas permite transferir a energia diretamente para dentro do material, onde é convertida em calor através da interação dos átomos e moléculas com o campo eletromagnético, em processos de condução iônica, relaxação dipolar, interação fóton-fônon. Assim, com microondas é possível um aquecimento volumétrico do material, o que resulta na possibilidade de aplicação de altas taxas de aquecimento, reduzindo marcadamente os tempos de processamento e sobrepondo uma série de dificuldades

observadas em processos que utilizam técnicas convencionais de aquecimento rápido [1]. Além do aquecimento volumétrico, outras características do processamento com microondas são a formação de gradientes de temperaturas e os fluxos de calor invertidos, comparativamente ao processo de aquecimento convencional [2].

A deposição direta da energia no interior do material a ser processado elimina a necessidade de gastos energéticos, aquecendo paredes dos fornos e móveis e suportes refratários. O que, associado à possibilidade de altas taxas de aquecimento e menores tempos de processamento permite uma significativa redução no consumo de energia, particularmente em processos que utilizam elevadas

temperaturas, já que as perdas térmicas aumentam drasticamente com o aumento da temperatura [3].

O aquecimento com energia de microondas possui várias vantagens frente às técnicas convencionais de aquecimento, como economia de energia, considerável redução do tempo de processamento, altas taxas de aquecimento (limitadas, em teoria, apenas à potência utilizada) e obtenção de microestruturas finas e uniformes. Outras vantagens surgem ao se considerar também o “efeito microondas” (efeito não-térmico provocado pelo campo eletromagnético), que é advogado por vários pesquisadores, e que possibilitaria redução de temperaturas de processamento, intensificação de taxas de reação e/ou cinéticas de reação, aceleração das taxas de densificação, e obtenção de altas densidades em processos de sinterização, sem a necessidade de aditivos [4-6].

Essas vantagens fazem a tecnologia de microondas muita atrativa em virtude de seus potenciais econômicos e benefícios tecnológicos [1, 6], todavia, para se obter todas essas vantagens nos processos de sinterização com microondas, alguns desafios tem que ser superados. Por exemplo, a absorção volumétrica aproximadamente uniforme de energia permite elevadas taxas de aquecimento, mas, no entanto, não garante uma distribuição uniforme de temperatura durante o aquecimento, em virtude das perdas térmicas nas superfícies fazerem com que o exterior torne-se mais frio que a região interior [3]. Assim, em materiais cerâmicos com baixas condutividades térmicas, grandes gradientes térmicos podem se desenvolver dentro da amostra. Com altas taxas de aquecimento esses gradientes podem se intensificar, causando variações de densificação nas peças, heterogeneidade microestrutural e por fim formação de trincas no material [7]. Esse comportamento é comumente observado ao se processar materiais com alta perda dielétrica, em virtude do rápido aquecimento do material ao ser exposto às microondas e da existência de perdas de energia em sua superfície.

As dificuldades associadas ao processamento com microondas também são observadas quando os materiais a serem processados não absorvem adequadamente as microondas em baixas temperaturas, como é o caso da maioria das cerâmicas, incluindo-se as porcelanas, quando se utilizam baixas frequências no seu processamento (inferiores a 2,45 GHz). Nesses casos, longos tempos são requeridos para o aquecimento do material, o que acarreta uma série de pontos negativos, como gradiente de temperatura na amostra, crescimento exagerado de grãos e heterogeneidades microestruturais [8, 9].

A utilização de altas potências de irradiação visando contrapor as baixas perdas dielétricas dos materiais a serem processados pode provocar gradientes de temperatura acentuados, excitação dos gases presentes na câmara do forno, com formação de descargas elétricas, “thermal runaway” descontrolado, geração de trincas e até destruição da amostra [10-13].

Particularmente no caso das porcelanas, ainda há o agravante de ocorrer uma brusca mudança nas suas propriedades dielétricas quando da formação de fases

líquidas em altas temperaturas, o que aumenta acentuada e rapidamente as perdas dielétricas.

Para superar várias das dificuldades observadas na sinterização de materiais cerâmicos e obter-se aquecimento rápido em baixas temperaturas e uniformidade na distribuição de temperaturas ao longo do corpo cerâmico durante a sinterização, foram desenvolvidas as técnicas de sinterização híbrida.

Na sinterização híbrida com microondas (“microwave hybrid heating - MHH”), também conhecida como sinterização assistida, há o aquecimento indireto da amostra em baixas temperaturas e na frequência em que o equipamento é comercialmente disponível, o que permite processar materiais que são transparentes à energia de microondas em baixas temperaturas. Após atingir uma temperatura mais elevada, a peça passa a absorver a energia de microondas mais eficientemente e aquece rapidamente. No entanto, o aquecimento híbrido possibilita também obter uma distribuição uniforme de temperatura no corpo cerâmico durante o aquecimento, mesmo em elevadas temperaturas e tanto em materiais com altas perdas dielétricas como em materiais com baixas perdas dielétricas em temperatura ambiente.

A obtenção de homogeneidade térmica ao longo da peça durante a sinterização, minimiza tanto a influência das perdas térmicas superficiais no desenvolvimento de heterogeneidades microestruturais, como a influência das variações bruscas das características dielétricas do material com o aumento de temperatura na formação de heterogeneidades micro-estruturais e desenvolvimento de “hot spots” e “thermal runaway” descontrolado.

O aquecimento híbrido pode ser realizado com o uso de um sistema de aquecimento externo, usando-se arranjos de aquecimento convencionais como resistências elétricas, sistemas de indução, queima de gás natural, etc., ou com materiais com elevadas perdas dielétricas, chamados susceptores, que atuam como agentes auxiliares de aquecimento.

Esse trabalho tem por objetivo a utilização da sinterização híbrida com microondas, usando materiais susceptores, na queima rápida de materiais cerâmicos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram sinterizados materiais cerâmicos que requerem baixas temperaturas para densificação (< 1200 °C). Os materiais apresentam características dielétricas distintas, sendo estudados materiais com elevadas perdas dielétricas (varistores ZnO-CuO e ferrita), e materiais que apresentam mudanças bruscas no comportamento dielétrico com o aumento de temperatura, com pequenas perdas dielétricas na temperatura ambiente, mas perdas elevadas em altas temperaturas (porcelanas).

Os materiais utilizados nos processos de sinterização foram os seguintes:

- varistores ZnO-CuO, com composição contendo 98% de pó e 2% de frita de vidro, sendo o D_{50} do pó $\approx 0,5 \mu\text{m}$

e a da frita de vidro $\approx 4,5 \mu\text{m}$ (detalhes do processamento podem ser encontrados em [15]).

- ferrita $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, sintetizada por reação de combustão [16], apresentando um tamanho de aglomerado $D_{50} \approx 4,5 \mu\text{m}$, e um tamanho de partícula, calculado de acordo com a área superficial, 26,2 nm.

- composições triaxiais de porcelanas [14], Tabela I, referentes a formulações de cerâmicas dentárias (D), elétricas (E) e sanitárias (S), com quartzo, feldspato, caulim e argila “ball clay”, todos de procedência Minasolo;

Tabela I - Formulações triaxiais de porcelanas [14].

[Table I - Triaxial formulation of the porcelains]

Formulação	Dentária (D)	Elétrica (E)	Sanitária (S)
Quartzo	10,8	21,5	10,8
Ball clay/caulim	9,7	38,5	49,2
Feldspato	79,5	40,0	40,0

As amostras de ferrita foram prensadas uniaxialmente a 23 MPa em molde com 20 mm de diâmetro, e em seguida prensadas isostaticamente a 200 MPa. O diâmetro final das pastilhas situou-se em torno de 19 mm. As amostras de porcelana foram prensadas uniaxialmente em molde de 20 mm a 125 MPa. As amostras de varistores foram prensadas uniaxialmente a 88 MPa em molde com 10 mm de diâmetro. A espessura final das amostras foi de $\sim 3 \text{ mm}$.

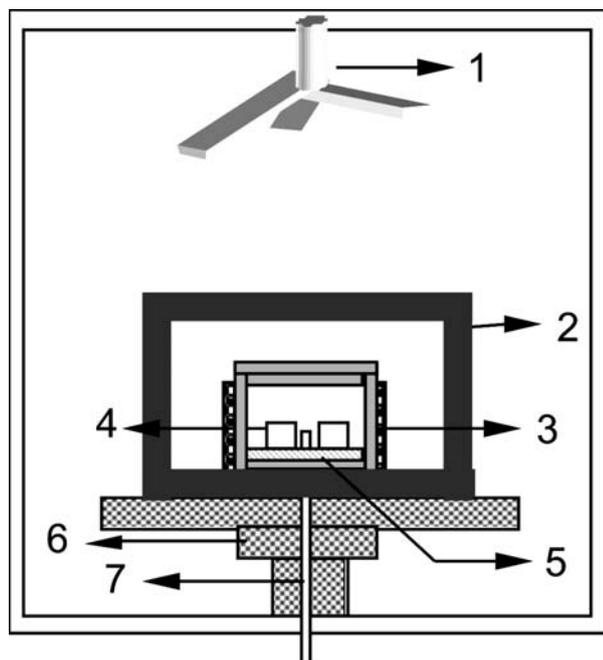


Figura 1: Esquema de sinterização das amostras cerâmicas (fora de proporção): 1) defletor, 2) isolamento, 3) susceptor, 4) cadinho cerâmico, 5) amostra e suporte, 6) mesa rotatória, 7) termopar.

[Figure 1: Scheme of the sintering setup (not on scale): 1) deflector, 2) insulator, 3) susceptor, 4) ceramic crucible, 5) sample and holder, 6) rotating table, 7) thermocouple.]

As pastilhas foram submetidas a processos de sinterização em forno de microondas (Cober Electronics, modelo MS6K) a 2,45 GHz, com material susceptor como agente auxiliar de aquecimento para a sinterização híbrida. A Fig. 1 ilustra o esquema para a sinterização das amostras. A fim de propiciar uma comparação dos resultados as amostras também foram sinterizadas em forno convencional.

Cada material apresentou particulares condições de sinterização híbrida com microondas. As amostras de varistores foram sinterizadas conforme as condições apresentadas na Tabela II. As amostras de ferrita nas seguintes condições: em forno convencional a 1200 °C por 2 h, com taxa de aquecimento de 5 °C/min, sinterização híbrida em microondas a 1200 °C por 20 min, com taxa de aquecimento de 100 °C/min até 1100 °C e 50 °C/min até 1200 °C. As amostras de porcelanas foram submetidas às seguintes sinterizações: convencional com taxa de aquecimento de 5 °C/min e patamares de queima de 30 e 60 min, sinterização híbrida com microondas com taxas de aquecimento de 60 °C/min até 1000 °C e de 25 °C/min até a temperatura de queima, com tempos de patamares de 6 e 8 min. O monitoramento e controle de temperatura foram feitos com um termopar tipo K e um sistema de controle de aquecimento desenvolvido no LaDProM.

As densidades das amostras sinterizadas foram determinadas pelo método de Arquimedes com imersão em água e as suas microestruturas foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura, MEV (Phillips, XL30 FEG). As amostras de porcelanas também foram submetidas à difração de raios X (Siemens, D500).

Tabela II - Condições de sinterização dos varistores ZnO-CuO.

[Table II - Sintering conditions for the ZnO-CuO varistors.]

amostras	taxa de aquecimento (°C/min)	temperatura (°C)	tempo (min)	densidade (%D.T.)
MA ^a	105	850	0,25	80
MB ^a	60	850	2	91
MC ^a	60	850	1	86
MD ^a	60	800	2	95
CA ^b	5	850	30	90
CB ^b	5	850	60	97

^asinterização híbrida com microondas, ^bsinterização convencional

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na sinterização dos varistores de ZnO-CuO foi usada uma composição já estudada e sinterizada convencionalmente [15], o que possibilitou uma rápida definição da temperatura de queima. As amostras de varistores ZnO-CuO foram sinterizadas em tempos inferiores a 20 min e com taxas de até 100 °C/min (Tabela II). Buscou-se reproduzir taxas de aquecimento semelhantes às reportadas em pesquisas

usando microondas para a sinterização de varistores à base de ZnO [17-19].

A Tabela II apresenta as densidades obtidas para as amostras de ZnO-CuO sinterizadas em microondas. Para facilitar a comparação de resultados, também são apresentados valores obtidos com amostras sinterizadas convencionalmente. Pode-se observar que as amostras sinterizadas em microondas atingiram densidades semelhantes às obtidas em queima convencional, entretanto em um tempo significativamente inferior.

As propriedades elétricas dos varistores sinterizados em microondas foram superiores às obtidas com a sinterização convencional. O coeficiente de não-linearidade, α , atingiu valores (comparando em densidade equivalente) cerca de 3 vezes superiores aos obtidos com a sinterização convencional (146 versus 56), e os valores da corrente de perdas, J_L , foram significativamente reduzidos (182 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ para 56 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) [3]. Detalhamento da caracterização elétrica pode ser encontrado em [3].

A Fig. 2 apresenta as micrografias de amostras sinterizadas em microondas (amostra MD da Tabela II) e em forno convencional (amostra CB). Não foi feita a contagem do

tamanho médio de grão em virtude da pequena quantidade de grãos; no entanto, com base na Fig. 2, observa-se que, de forma geral, o tamanho de grão dos varistores sinterizados em microondas e dos sinterizados em forno convencional foi aproximadamente igual. No entanto, observa-se que na sinterização rápida em microondas não houve segregação do CuO, o que pode ser uma das razões do elevado coeficiente de não-linearidade dos varistores sinterizados em microondas [3].

A sinterização das amostras de ferrita foi conduzida com taxa de aquecimento de ~ 100 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, como mencionado anteriormente, não ultrapassando um tempo total de aquecimento de 35 min. As taxas de aquecimento (100 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$) tomaram como referência valores observados em estudos de sinterização rápida convencional [20, 21].

As ferritas, por se tratarem de materiais que interagem intensamente com o campo eletromagnético, podem apresentar o desenvolvimento de gradientes acentuados de temperatura durante sua sinterização em microondas, especialmente quando se usam altas taxas de aquecimento. Essa possibilidade ressalta a importância do sistema susceptor na sinterização dessas cerâmicas. Nesse sentido, estudos evidenciaram que o uso inadequado dos susceptores também pode conduzir a heterogeneidades térmicas nas amostras, com manifestações tão intensas que provocam o “thermal runaway” descontrolado e formação de trincas [22].

A Tabela III apresenta os valores das densidades obtidas com a queima híbrida com microondas e em forno convencional. Pode-se observar que comparativamente à sinterização convencional a sinterização híbrida com microondas permitiu atingir densidade significativamente mais elevada e com um tempo de processamento muito reduzido. As Figs. 3 e 4 apresentam as micrografias das amostras sinterizadas em microondas e as distribuições dos tamanhos de grãos, respectivamente. Os valores de tamanho médio dos grãos do interior e da extremidade das amostras sinterizadas usando microondas estão presentes na Tabela III.

Tabela III - Densidade e tamanho médio de grãos de amostras de ferritas sinterizadas em forno convencional e em microondas.

[Table III - Density and average grain size of ferrites sintered in conventional and microwave ovens.]

amostras ^a	densidade (% D.T.)	tamanho de grão \pm desvio padrão (μm)	
		Interior	Extremidade
ferrita - C	95,4 \pm 0,93	2,87 \pm 1,11	
ferrita - M	99,3	2,8 \pm 1,6	2,9 \pm 1,6

^aa letra C designa sinterização convencional (1200 $^{\circ}\text{C}/2$ h) e a letra M designa sinterização em microondas (1200 $^{\circ}\text{C}/20$ min)

As Figs. 3 e 4 mostram que as amostras submetidas à sinterização rápida com microondas apresentaram homogeneidade microestrutural, não havendo diferença no tamanho de grão entre a região próxima à superfície da amostra e a região no centro (interior) da amostra, o que

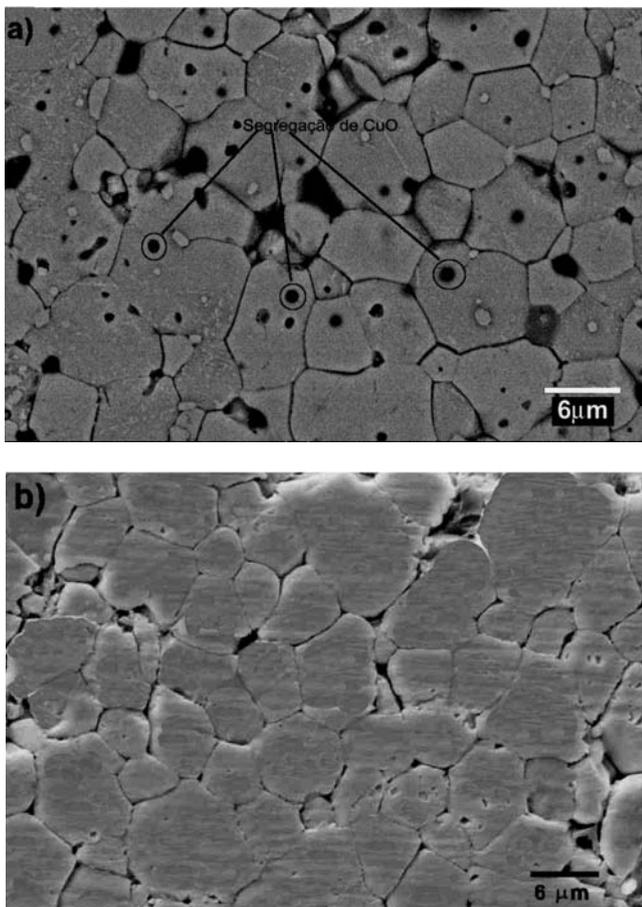


Figura 2: Micrografias (microscopia eletrônica de varredura) de varistores ZnO-CuO sinterizados em a) forno convencional e b) forno de microondas.

[Figure 2: SEM micrographs of ZnO-CuO varistors sintered in conventional (a) and microwave (b) ovens.]

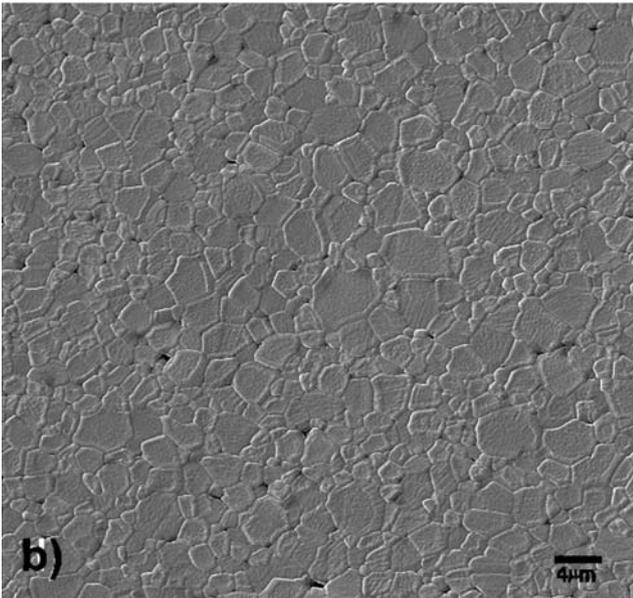
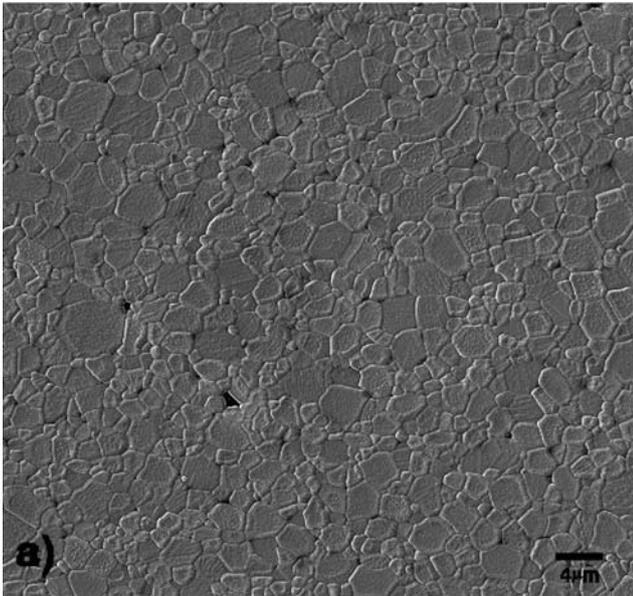


Figura 3: Micrografias (microscopia eletrônica de varredura) de amostra de ferrita sinterizada em forno de microondas: a) região interior da amostra e b) região próxima a superfície da amostra. [Figure 3: SEM micrographs of ferrites sintered in microwave oven: a) bulk and b) near the surface.]

indica que não houve gradiente acentuado de temperatura na amostra. O tamanho de grão obtido com a sinterização híbrida foi similar ao obtido com a sinterização convencional; entretanto, está associado a amostras significativamente mais densas. Esses resultados evidenciam a elevada eficiência do sistema desenvolvido de sinterização híbrida com microondas, na sinterização rápida e uniforme de cerâmicas com elevadas perdas dielétricas, como as ferritas e os varistores ZnO-CuO.

Como mencionado anteriormente, alguns materiais apresentam alterações bruscas das propriedades dielétricas com o aumento da temperatura; exemplos marcantes são

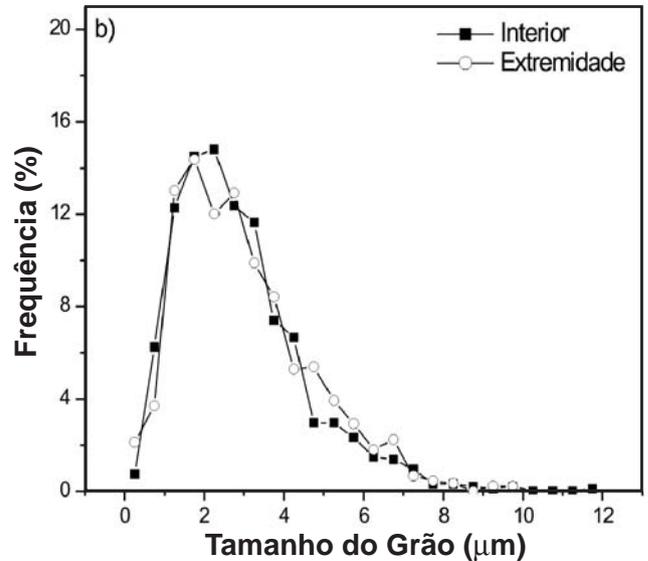


Figura 4: Distribuição do tamanho de grão de amostra de ferrita sinterizada em forno de microondas.

[Figure 4: Grain size distribution of ferrite sintered in microwave oven.]

as porcelanas. Durante a queima destes materiais, há uma geração de grande quantidade de fases vítreas, em uma pequena faixa de temperaturas, provocando uma mudança muito brusca no comportamento dielétrico, o que é especialmente importante ao se trabalhar com sinterização usando microondas, particularmente em ciclos de queima rápida, porque irá gerar elevadas dificuldades no controle do aquecimento.

Durante os estudos de sinterização de porcelanas observou-se uma série de deformações piropilásticas e “thermal runaways” descontrolados nas amostras, especialmente nas da composição D, que apresentava maior quantidade de fundentes. Esse comportamento está associado à formação de uma grande quantidade de fase líquida em altas temperaturas, que irá absorver mais acentuadamente a energia de microondas que outras fases presentes na amostra, ocorrendo o aumento da temperatura do sistema, com a fusão de ainda mais material e diminuição da viscosidade da fase líquida. Entretanto, com o adequado controle da curva de aquecimento, essas questões foram superadas. A diminuição das taxas de aquecimento em temperaturas acima de 1000 °C possibilitou sinterizar com sucesso todas as formulações.

Superadas as dificuldades iniciais, as amostras sinterizadas em microondas não apresentaram trincas ou zonas de aquecimento preferencial (desenvolvimento de “hot spots”), o que evidencia uma homogeneidade térmica no processamento e ressalta eficiência do sistema de sinterização híbrida com microondas.

A Fig. 5 apresenta a absorção de água das amostras de porcelanas sinterizadas em ciclos de queima rápida em microondas. Pode-se observar que para se atingir o mesmo nível de absorção com a queima rápida em microondas foi necessário o uso de temperaturas cerca de 20 °C superiores às utilizadas na queima convencional (a 5 °C/min). É observado

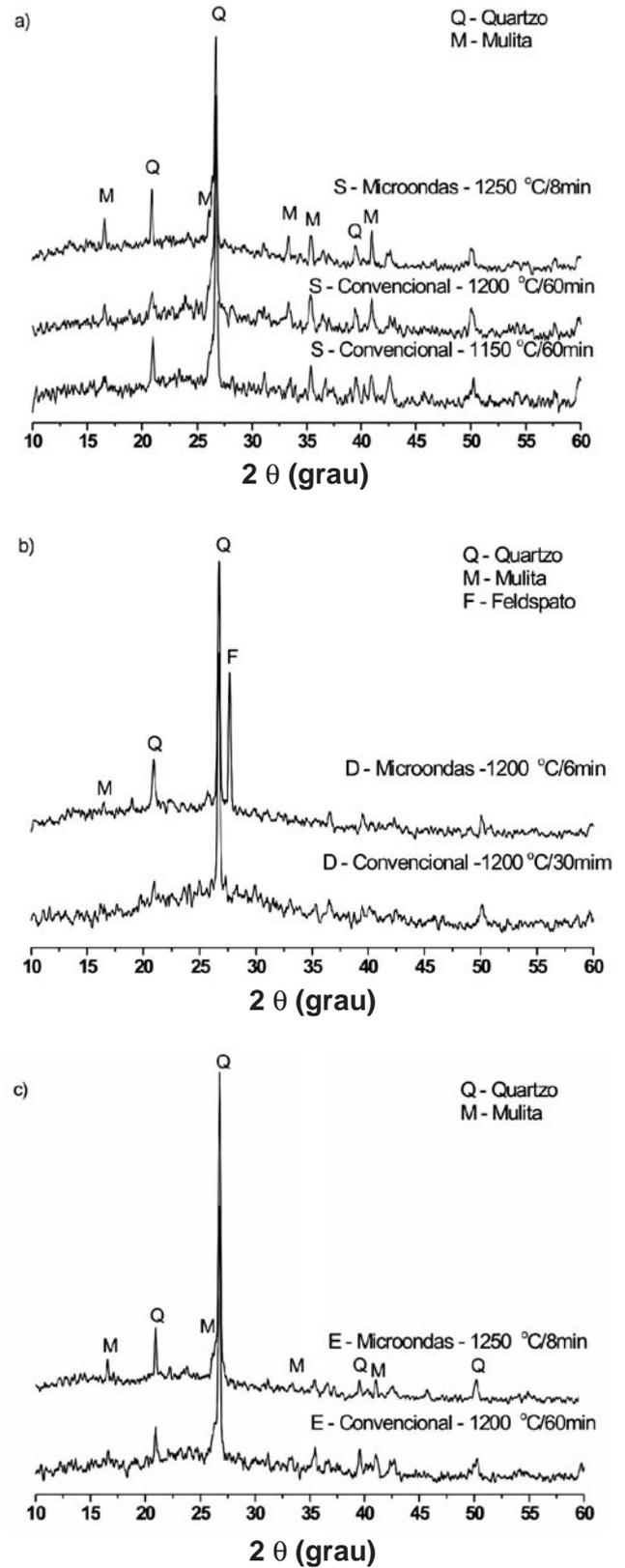
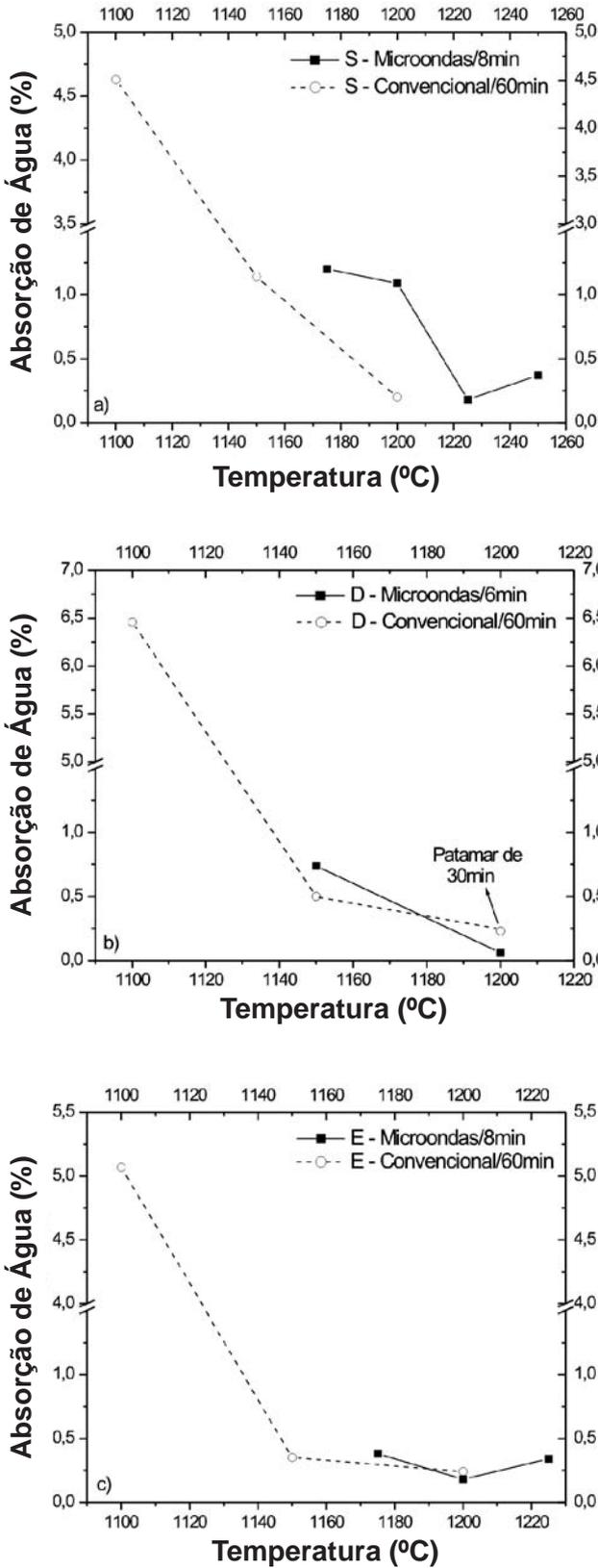


Figura 5: Absorção de água versus temperatura de queima das amostras de porcelana sinterizadas em forno de microondas: a) composição S; b) composição D; c) composição E.
 [Figure 5: Water absorption as a function of the calcination temperature of porcelains sintered in microwave oven: a) specimen S; b) specimen D; c) specimen E.]

Figura 6: Difratogramas das amostras de porcelana sinterizadas em forno de microondas: a) composição S; b) composição D; c) composição E.
 [Figure 6: X-ray diffraction patterns of porcelains sintered in microwave oven: a) specimen S; b) specimen D; c) specimen E.]

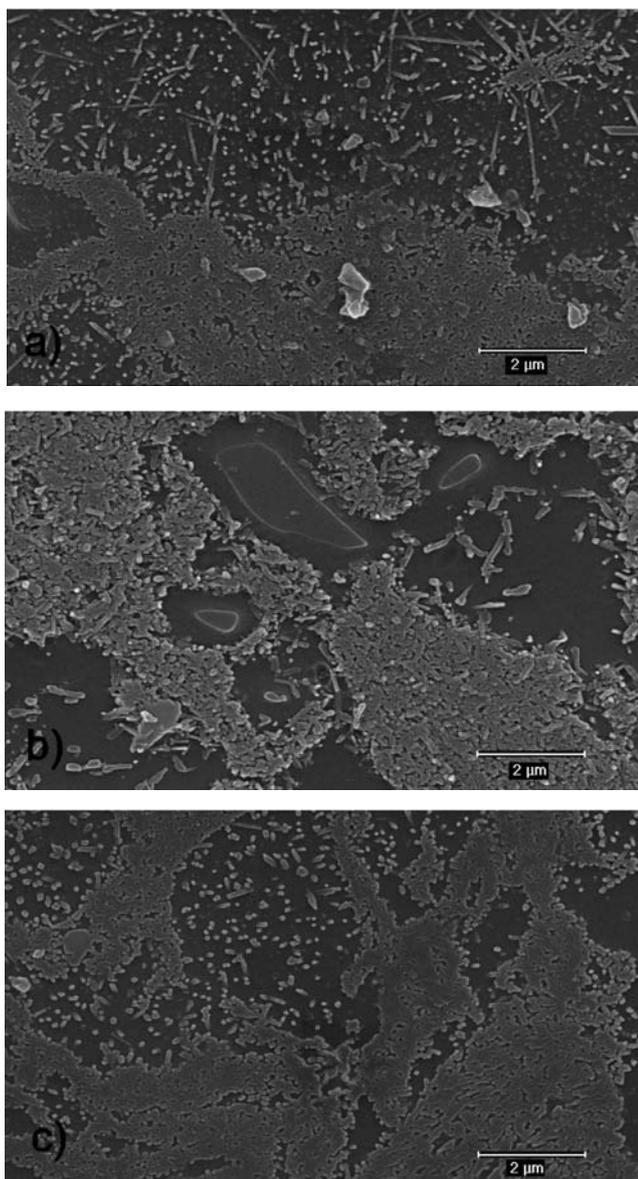


Figura 7: Micrografias (microscopia eletrônica de varredura) das amostras de porcelanas sinterizadas em forno de microondas: a) composição S; b) composição E; c) composição D.

[Figure 7: SEM micrographs of porcelain sintered in microwave oven: a) specimen S; b) specimen E; c) specimen D.]

que maiores temperaturas de queima são uma característica de ciclos de queima rápida [26-28]; assim acredita-se que a necessidade de temperaturas mais elevadas não está associada à questão do uso de energia de microondas, mas à queima rápida em si (ressalte-se que as formulações utilizadas [14] eram composições aplicadas em queima convencional e não em ciclos de queima rápida).

A Fig. 6 apresenta os difratogramas de amostras queimadas em microondas com absorção de água inferior a 0,5%. Pode-se observar a presença de mulita e quartzo em todos os corpos de prova. Os corpos de prova da formulação D também apresentaram feldspato, o que pode estar relacionado ao fato do rápido ciclo de queima não permitir

a total fusão do material (a composição D era a que possuía maior quantidade de feldspato).

A Fig. 7 apresenta micrografias de amostras queimadas em microondas. Pode-se observar a presença de mulita primária e o desenvolvimento incipiente de mulita secundária em todas as amostras, sendo esse desenvolvimento mais acentuado na amostra da composição S.

Poucos estudos abordam a sinterização de porcelanas com energia de microondas, com nenhum deles utilizando materiais susceptores diretamente no processo de sinterização [23-25]. Essas pesquisas abordando o processamento de porcelanas em microondas usaram ou alta frequência, 84 GHz, ou arranjos especiais de isolamento, que nesse caso também funcionavam como agentes de aquecimento híbrido. Esses artifícios de processamento por um lado são onerosos (no caso de elevadas frequências) e por outro são muito laboriosos. Ademais, o ciclo de aquecimento obtido está em torno de 200 min. Já a utilização da sinterização híbrida permitiu a sinterização de porcelanas de forma mais rápida e prática. O maior ciclo de aquecimento não ultrapassou 40 min e o resfriamento foi de ~ 30 min. Se necessário, também é possível uma fácil adaptação a um sistema de queima contínua, o que não é observado com o sistema de isolamento desenvolvido em outros estudos [23-25].

Os resultados apresentados evidenciam a eficiência do sistema de sinterização híbrida com microondas desenvolvido no LaDProM na sinterização rápida e uniforme de cerâmicas que requerem baixas temperaturas de sinterização (<1200 °C), podendo ser aplicado na sinterização de cerâmicas com altas perdas dielétricas na temperatura ambiente e também de cerâmicas difíceis de serem processadas em microondas, em virtude das bruscas e intensas alterações de suas propriedades dielétricas com o aumento de temperatura. Os resultados também demonstram, tal como citado anteriormente [29], que o perfeito entendimento das propriedades dielétricas dos materiais cerâmicos a serem processados e das peculiaridades e características do processamento de materiais com microondas, permite sobrepor todas as dificuldades que venham a surgir durante a sinterização de cerâmicas com microondas.

CONCLUSÕES

O sistema de sinterização híbrida com microondas pode ser usado com sucesso na sinterização rápida e uniforme de varistores ZnO-CuO, ferrita e porcelanas, independentemente das características particulares de sinterização em microondas desses materiais;

O sistema desenvolvido possibilita ciclos de processamento inferiores aos reportados sobre sinterização com microondas, sem, entretanto, o sacrifício da homogeneidade microestrutural dos materiais;

É possível a sinterização rápida e uniforme de materiais com altas perdas dielétricas, como varistores ZnO-CuO, em ciclos de aquecimento inferiores a 20 min, e ferritas, em ciclos de aquecimento não ultrapassando 35 min e com

taxa de aquecimento de até 100 °C/min, sem a ocorrência de “thermal runaway” descontrolado;

É possível a sinterização rápida e uniforme de materiais que apresentam variações bruscas e acentuadas nas propriedades dielétricas com o aumento da temperatura, como as porcelanas, em ciclos de aquecimento inferiores a 40 min, sem a observação de piro-deformação e “thermal runaway” descontrolado.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP (05/60095-6, 06/50121-5) e ao CNPq (476382/2004-1) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] G. Link, L. Feher, M. Thumm, H. J. Ritzhaupt-Kleissl, R. Böhme, A. Weisenburger, *IEEE Trans. Plasma Science* **27**, 2 (1999) 547.
- [2] D. K. Agrawal, *Current Opinion in Solid State & Mater. Sci.* **3** (1998) 480.
- [3] R. R. Menezes, P. M. Souto, E. Fagury-Neto, R. H. G. A. Kiminami, *Proc. 4th World Cong. Microwave and Radio Frequency Appl.*, Eds. R. L. Shulz, D. C. Folz, The Microwave Working Group, Arnold, MD (2004) 118.
- [4] W. H. Sutton, *Am. Ceram. Soc. Bull.* **68**, 2 (1989) 376.
- [5] D. E. Clark, W. H. Sutton, *Ann. Rev. Mater. Sci.* **26** (1996) 299.
- [6] A. W. Fliflet, R. W. Bruce, R. P. Fischer, D. Lewis, L. K. Kurihara, B. A. Bender, G. M. Chow, R. J. Rayne, *IEEE Trans. on Plasma Science* **28**, 3 (2000) 924.
- [7] A. Birnboim, D. Gershon, J. Calame, A. Birman, Y. Carmel, J. Rodgers, B. Levush, Y. V. Bykov, A. G. Eremeev, V. V. Holoptsev, V. E. Semenov, D. Dadon, P. L. Martin, M. Rosen R. Hutcheon, *J. Am. Ceram. Soc.* **81**, 6 (1998) 1493.
- [8] W. W. Ho, *MRS Symp. Proc.: Microwave Processing of Materials I*, Eds. W. Sutton, M. H. Brooks, I. J. Chabinsky, Materials Research Society, Pittsburgh, **124** (1988) 137.
- [9] D. S. Patil, *Ceramic Transactions, Microwaves: Theory and Applications in Materials Processing*, Eds. D. E. Clark, F. D. Gac, W. H. Sutton, American Ceramic Society, Westerville, **21** (1991) 301.
- [10] D. Katz, *MRS Symp. Proc.: Microwave Processing of Materials I*, Eds. W. Sutton, M. H. Brooks, I. J. Chabinsky, Materials Research Society, Pittsburgh, **124** (1988) 219.
- [11] M. A. Janney, C. L. Calhon, H. D. Kimrey, *Ceramic Transactions, Microwaves: Theory and Applications in Materials Processing*, Eds. D. E. Clark, F. D. Gac, W. H. Sutton, American Ceramic Society, Westerville, **21** (1991) 311.
- [12] Y. L. Tian, *Ceramic Transactions, Microwaves: Theory and Applications in Materials Processing*, Eds. D. E. Clark, F. D. Gac, W. H. Sutton, American Ceramic Society, Westerville, **21** (1991) 283.
- [13] M. A. Janney, C. L. Calhon, H. D. Kimrey, *J. Am. Ceram. Soc.* **75**, 2 (1992) 341.
- [14] F. H. Norton, *Introdução à Tecnologia Cerâmica*, Trad. J. V. de Souza, Edgard Blücher, S. Paulo (1973) 324.
- [15] J. V. Bellini, *Síntese por liofilização e caracterização de varistores ZnO-CuO-Vidro*, Tese de Doutorado, UFSCar, S. Carlos (2001) 121.
- [16] A. C. F. M. Costa, *Síntese por reação de combustão, sinterização e caracterização de ferita Ni-Zn*, Tese de Doutorado, UFSCar, S. Carlos (2002) 221.
- [17] C. S. Chen, *J. Mater. Sci.* **38** (2003) 1033.
- [18] C. T. Kuo, C. S. Chen, I. N. Lin, *J. Am. Ceram. Soc.* **81**, 11 (1998) 2942.
- [19] W. C. Lee, K. S. Liu, I. N. Lin, *J. Mater. Sci.* **25** (2000) 4841.
- [20] A. Dias, N. D. S. Mohallem, R. L. Moreira, *Mater. Res. Bull.* **33**, 3 (1998) 475.
- [21] Y. S. Cho, *Mater. Res. Bull.* **34**, 14-15 (1999) 2361.
- [22] P. Pigram, *Ceramic Transactions, Microwaves: Theory and Applications in Materials Processing II*, Eds. J. Binner, D. Whitaker, American Ceramic Society, Westerville, Ohio, **36** (1993) 123.
- [23] M. Sato, T. Mutoh, T. Shimotuma, M. Mizuno, S. Obata, *Ceramic Transactions, Microwaves: Theory and Applications in Materials Processing V*, Eds. D. E. Clark, J. G. P. Binner, D. A. Lewis, American Ceramic Society, Westerville, Ohio, **111** (2001) 277.
- [24] S. Takayama, M. Mizuno, S. Obata, M. Sato, T. Mutoh, T. Shimotuma, *Ceramic Transactions, Microwaves: Theory and Applications in Materials Processing V*, Eds. D. E. Clark, J. G. P. Binner, D. A. Lewis, American Ceramic Society, Westerville, Ohio, **111** (2001) 305.
- [25] M. Mizuno, T. Takayama, S. Obata, M. Sato, T. Mutoh, *Ceramic Transactions, Microwaves: Theory and Applications in Materials Processing V*, Eds. D. E. Clark, J. G. P. Binner, D. A. Lewis, American Ceramic Society, Westerville, Ohio, **111** (2001) 313.
- [26] M. P. Harmer, E. W. Roberts, R. J. Brook, *Trans. J. Br. Ceram. Soc.* **78** (1979) 22.
- [27] M. P. Harmer, R. J. Brook, *Trans. Br. Ceram. Soc.* **80**, 5 (1981) 147.
- [28] T. Manfredini, L. Pennisi, *Ceramic Transactions, Science of Whitewares*, Eds. V. E. Henkes, G. Y. Onoda, W. M. Carty, American Ceramic Society, Westerville, Ohio (1996) 213.
- [29] R. R. Menezes, P. M. Souto, R. H. G. A. Kiminami, *Cerâmica* **53**, 325 (2007) 1173.
(*Rec. 01/09/2006, Ac. 24/11/2006*)