

## Cerâmica Porosa - Incorporação de Chamote em Massas Contendo Ball Clay, Alumina e Talco

M. Y. M. Souza<sup>1\*</sup>; H. L. Lira<sup>1</sup>; L. N. L. Santana<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande – PB, 58429-900

(Recebido em 05/01/2018; revisado em 16/01/2018; aceito em 27/02/2018)  
(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

### Resumo:

As cerâmicas porosas de cordierita têm despertado a atenção de pesquisadores em virtude de suas propriedades como estabilidade térmica, alta permeabilidade, resistência mecânica e química. Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar a incorporação de diferentes teores de chamote em massas cerâmicas contendo argila ball clay, alumina e talco para produção de cerâmicas porosas de cordierita. Inicialmente, foram preparadas composições contendo 0, 10, 20, 30 e 40% em peso de chamote. Os corpos de prova foram obtidos pelo processo de prensagem e sinterizados à 1050 e 1100 °C. Posteriormente, as peças cerâmicas foram analisadas por difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura. Foram determinadas a retração linear, absorção de água, porosidade aparente, densidade e resistência mecânica. Os resultados indicaram a presença da fase  $\alpha$ -cordierita. A adição de chamote favoreceu menor retração e formação de peças cerâmicas porosas, no entanto com baixos valores de resistência mecânica.

**Palavras-chave:** Cordierita; chamote; sinterização; cerâmicas porosas;

### Abstract:

The porous cordierite ceramics have attracted the attention of researchers due to their properties as thermal stability, high permeability, mechanical and chemical resistance. In this sense, the objective of this work was to evaluate the incorporation of different chamotte content in ceramics masses containing ball clay, alumina and talc for the production of porous cordierite ceramics. Initially, it were prepared compositions containing 0, 10, 20, 30 and 40 wt.% of chamotte. The specimens were obtained by pressing and sintered at 1050 and 1100 °C. Subsequently, the ceramic pieces were analyzed by X-ray diffraction and scanning electron microscopy. The linear retraction, water absorption, apparent porosity, density and mechanical resistance were determined. The results indicated the presence of the  $\alpha$ -cordierite phase. The addition of chamotte favored less retraction and formation of porous ceramic pieces, however with low values of mechanical resistance.

**Keywords:** Cordierite; chamotte; sintering; porous ceramics.

### 1. Introdução

Cordierita ( $2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$ ) é um silicato de magnésio e alumínio que apresenta propriedades excelentes como baixo coeficiente de expansão térmica, baixa constante dielétrica, alta estabilidade mecânica, inércia química, alta refrateriedade e resistência mecânica elevada [1–3]. Este aluminossilicato se apresenta como uma opção inovadora devido a diversidade de aplicações industriais, como suporte catalítico [4–6], componentes eletrônicos [7–11], refratários [6,12,13], isolantes térmicos [14,15] e membranas [16–19].

Produtos cerâmicos de cordierita estão sendo obtidos a partir de rotas sintéticas, dentre elas estão a técnica sol-gel [20], recristalização vítrea [21], método Pechinni [22], co-precipitação [23] e a sinterização em fase líquida [24]. No entanto, esses métodos requerem a utilização de precursores caros ou em alguns casos, altas temperaturas de processamento [25]. Portanto, na tentativa de reduzir os custos

de produção, a reação em estado sólido se apresenta como uma opção excelente devido a simplicidade de processo e a utilização de matérias-primas naturais para a obtenção de cordierita [26].

Na literatura há estudos [6,8,16,27–29] publicados sobre a fabricação de cordierita a partir da sinterização em estado sólido de misturas contendo argilas, talco e alumina. Estes materiais são adequados para produzir cordierita em virtude da presença dos óxidos necessários para a formação deste mineral que são  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{MgO}$ . Argilas e talco são matérias-primas que ocorrem abundantemente no nordeste brasileiro e se apresentam como opções economicamente viáveis devido ao baixo custo e a facilidade de processamento. Já a adição de alumina visa corrigir o teor de óxido de alumínio na formulação, de modo a se atingir o teor necessário para se produzir cordierita, de aproximadamente 35% na formulação.

\*Email: [mykaell.yan@gmail.com](mailto:mykaell.yan@gmail.com) (M. Y. M. Souza)

O chamote geralmente é um material inerte e não plástico gerado após a trituração de um material sinterizado acima da temperatura de trabalho [30]. A inclusão de chamote em formulações de cerâmicas porosas têm recebido grande atenção pois se apresenta como uma alternativa de baixo custo [31,32]. Além disso, pode facilitar a etapa de secagem e melhorar a trabalhabilidade da massa cerâmica [33,34].

A combinação adequada de matérias-primas e técnicas de processamento torna possível a obtenção de cerâmicas porosas com elevados valores de resistência mecânica, resistência ao ataque químico, elevada refratariedade e elevada uniformidade estrutural [35]. Portanto, estão sendo realizados grandes esforços em pesquisas tecnológicas e de inovação no processamento de cerâmicas porosas buscando obter materiais com estrutura porosa controlada e propriedades melhoradas [36].

Dentro desse contexto, o objetivo deste trabalho é obter cerâmicas porosas de cordierita a partir da sinterização de composições contendo chamote, argila ball clay, alumina e talco, utilizando o processo de prensagem.

## 2. Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas argila plástica *ball clay* e talco fornecidos pela empresa Armil, PB, e alumina cedida pela empresa Treibacher Schleifmittel Brasil. Estas matérias-primas foram escolhidas em virtude do seu baixo custo. Além disso, fornecem os óxidos principais para formação da cordierita que são  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{MgO}$ .

Neste trabalho, foram desenvolvidas composições com chamote e sem chamote. As composições estão representadas na Tabela 1.

Tabela 1. Composição das misturas (% por peso).

Componentes	Composições (%)				
	C0	C10	C20	C30	C40
Massa cerâmica pura	100	90	80	70	60
Chamote	0	10	20	30	40

Inicialmente, foi realizada a caracterização química das matérias-primas. As amostras devidamente beneficiadas em peneira ABNT 0,075 mm (n° 200) foram submetidas a determinação de composição química por fluorescência de raios X em equipamento Shimadzu EDX-720 à vácuo.

### Composição sem chamote (argila ball clay, alumina e talco)

A formulação da massa cerâmica da composição C0 (sem chamote) foi definida com base na estequiometria da cordierita (13,8%  $\text{MgO}$ , 34,8% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 51,4% de  $\text{SiO}_2$ ). Foram estabelecidos os seguintes percentuais: 23% argila *ball clay*, 19% de alumina e 58% de talco.

Após estabelecidos os percentuais, a massa cerâmica C0 foi homogeneizada em misturador a 300 RPM por 24h. A massa cerâmica foi beneficiada em peneira ABNT n° 200 (abertura 0,074 mm) e submetida as seguintes análises:

composição química por fluorescência de raios X (EDX, 720); tamanho de partículas por via úmida em granulômetro a laser (Cilas, modelo 1064); e composição mineralógica em difratômetro de raios X (Standard, modelo XRD 6000 Shimadzu) nas seguintes condições de operação: tensão de 40 KV, corrente de 30 mA, radiação  $\text{K}\alpha$  do cobre, faixa de varredura  $2\theta$  (5-60°) com velocidade do goniômetro de 2°/min e campo de amostragem de 0,02 graus.

### Composições com chamote (argila ball clay, alumina, talco e chamote)

Para a preparação do chamote, a massa cerâmica da composição C0 contendo 23% argila *ball clay*, 19% de alumina e 58% de talco, previamente homogeneizada foi submetida ao processo de sinterização em forno mufla (FLYER, modelo FE50RPN) à 1175 °C, taxa de aquecimento de 5 °C/min e permanência na temperatura máxima por 60 minutos. O material resultante foi beneficiado em peneira ABNT 0,075 mm (n° 200) e caracterizado quanto ao tamanho de partículas e composição mineralógica, utilizando-se os mesmos equipamentos e condições descritas anteriormente. O chamote produzido foi incorporado na massa cerâmica C0 nas seguintes percentagens: 10, 20, 30 e 40%.

### Preparação e sinterização dos corpos de prova

Para a preparação dos corpos de prova, as composições com aproximadamente 8% de umidade foram homogeneizadas em misturador a 300 RPM por 24h, beneficiadas em peneira ABNT 0,177 mm (n° 80) e submetidas ao processo de prensagem uniaxial a 6,4 MPa (65,7  $\text{Kg}/\text{cm}^2$ ) em prensa hidráulica manual. Os corpos de prova conformados foram secos em estufa à 110°C por 24h e sinterizados em forno mufla (FLYER, modelo FE50RPN) nas seguintes faixas de temperatura: 1050 e 1100 °C, taxa de aquecimento de 5 °C/min e tempo de permanência na temperatura máxima por 60 minutos.

### Propriedades físicas, mecânicas e microestruturais

Após a etapa de queima, foi realizado a caracterização mineralógica, física e mecânica dos corpos de prova. A caracterização mineralógica foi realizada por difração de raios X utilizando-se os mesmos equipamentos e condições descritas anteriormente. Para as caracterizações físicas e mecânicas, foram medidas as seguintes propriedades: retração linear, absorção de água, porosidade aparente, densidade e resistência mecânica. A retração linear foi medida com base na dimensão dos corpos de prova antes e após a queima. Os parâmetros de absorção de água, porosidade aparente e densidade foram determinados seguindo o princípio de Arquimedes. As medidas de tensão de ruptura à flexão foram realizados em equipamento Shimadzu (modelo Autograph AGX) com carga máxima de 50 KN e velocidade de carga de 0,5 mm/min.

As superfícies de fratura dos corpos de prova foram observadas com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (Shimadzu 5SX MCB-550).

### 3. Resultados e Discussão

A composição química das matérias-primas e da massa cerâmica C0 (sem chamote) estão apresentadas na Tabela 2. Na argila *ball clay* se encontram elevados teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Além destes, foram identificados  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$  que provavelmente estão associados às argilas como materiais acessórios ou impurezas. Essa argila apresenta composição química similar às estudadas por outros pesquisadores [16,37]. A alumina apresenta um elevado teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , enfatizando o seu elevado grau de pureza (99,2%). No talco foi observado elevados teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{MgO}$ , como também quantidades significantes de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . No entanto, assim como na *ball clay*, também foi identificado a presença de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$ . Enfatiza-se o uso do talco para compensar a deficiência do teor de  $\text{MgO}$  necessário para obtenção da cordierita.

Tabela 2. Composição química (% em massa) das matérias-primas determinadas por fluorescência de raios x (EDX).

Constituinte (%)	Argila Ball Clay	Alumina	Talco	Massa Cerâmica C0
$\text{SiO}_2$	57,9	0,3	55,1	43,3
$\text{Al}_2\text{O}_3$	30,0	99,2	12,3	32,5
$\text{MgO}$	1,9	-	20,5	12,5
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,3	-	7,8	7,3
$\text{CaO}$	4,7	0,2	2,6	3,0
$\text{K}_2\text{O}$	0,5	-	0,5	0,5
$\text{SO}_3$	0,6	0,3	0,4	0,1
$\text{TiO}_2$	0,6	-	0,2	0,3
<b>Outros óxidos</b>	0,5	-	0,5	0,5

(-) ausente

Para a massa cerâmica C0, são observados altos teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , assim como quantidades consideráveis de  $\text{MgO}$ . Estes óxidos estão presentes em quantidades próximas da composição teórica da cordierita que contém 13,8%  $\text{MgO}$ , 34,8% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 51,4% de  $\text{SiO}_2$ . Identifica-se também teores relevantes de óxidos fundentes como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$  que podem promover a formação de fase líquida em baixas temperaturas [38–40] e reduzir a temperatura de sinterização [41]. O teor destes óxidos podem promover o desenvolvimento de cordierita de ferro ou anortita [42,43]. O  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$  encontrados podem indicar que a mistura é rica em carbonatos [44] e podem atuar como modificadores de rede diminuindo a refratariedade das argilas [40]. A composição química desta massa cerâmica foi similar aos obtidos por Njoya [8].

Na Figura 1 estão ilustradas as curvas de distribuição de tamanho de partículas da massa cerâmica C0 e do chamote. A massa cerâmica C0 apresentou diâmetro médio de 11,0  $\mu\text{m}$ . Observa-se um teor de 15,8 % de partículas com tamanho abaixo de 2  $\mu\text{m}$ , 65,7 % de partículas na faixa entre 2 e 20

$\mu\text{m}$ , assim como uma parcela considerável de partículas largas com diâmetros acima de 20  $\mu\text{m}$ , totalizando 18,5 %. Portanto, esses resultados indicam que o elevado teor de finos (abaixo de 20  $\mu\text{m}$ ) na massa cerâmica sem chamote favorecerá a cinéticas das reações em função da maior área e energia superficial. Essa distribuição se apresentou similar a composição granulométrica da massa cerâmica utilizada por [16], os quais utilizaram argila *ball clay*, bentonita e talco na síntese de cordierita. Para o chamote, foi observado diâmetro médio de 18,8  $\mu\text{m}$ . A distribuição granulométrica indica que o chamote apresenta um teor de 40,6 % de partículas com tamanhos acima de 20  $\mu\text{m}$ . Além disso, 46,9 % da fração granulométrica é representada por um conjunto de partículas com tamanhos na faixa entre 2 e 20  $\mu\text{m}$ . Entretanto, verifica-se um teor considerável de partículas finas abaixo de 2 $\mu\text{m}$ , apresentando um percentual de 12,5 %. A distribuição granulométrica interfere significativamente sobre a plasticidade, empacotamento do sistema e no processamento do material [45].

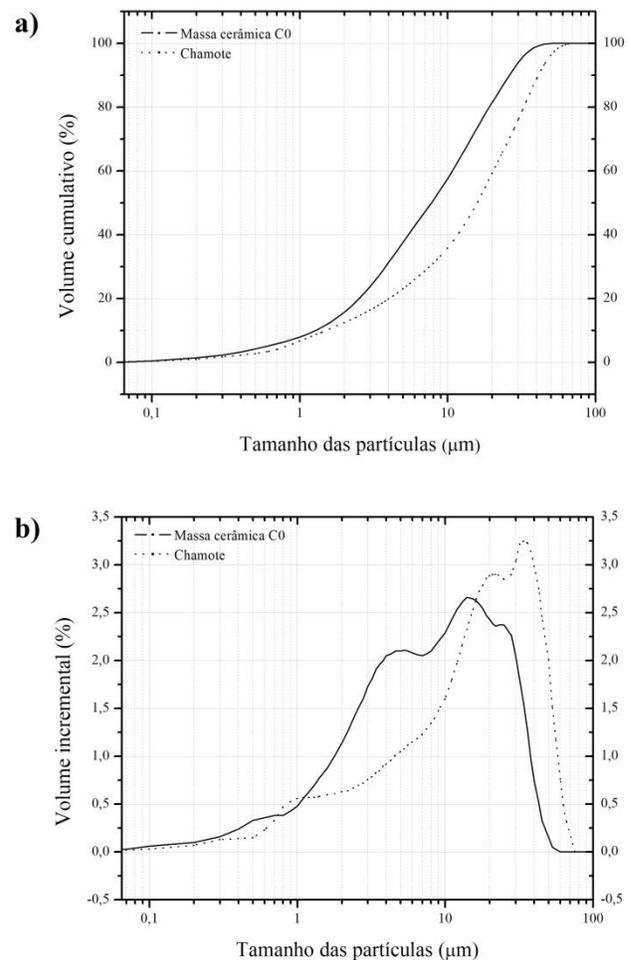


Figura 1. Curvas de distribuição granulométrica da massa cerâmica C0 e do chamote.

Os padrões de DRX da massa cerâmica C0 e do chamote estão apresentadas na Figura 2. A massa cerâmica C0 contém em sua composição os argilominerais caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (PCDF 29-1490) e montmorilonita

( $\text{NaO} \cdot 3\text{Al}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) (PCDF 13-0135) que provavelmente estão associados a argila *ball clay*. Pode-se observar a presença do talco ( $3\text{Mg}_4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) (PCDF 10-0173) e da alumina- $\alpha$  ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (PCDF 10-0173), enfatizando o uso destes para compensar as quantidades de  $\text{MgO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  necessárias para formação da cordierita. O quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) (PCDF 46-1045) provavelmente estar presente na forma de sílica livre ou combinada aos argilominerais. Enquanto que, acessórios como calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) (PCDF 89-1305) está relacionada ao teor de  $\text{CaO}$  e aparece em virtude da presença de carbonatos.

No chamote, foi observado a predominância da fase  $\alpha$ -cordierita (indialita) ( $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$ ) (JCPDS 13-0293) representada pelos picos mais intensos, acompanhada de safirina ( $4\text{MgO} \cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) (JCPDS 21-0549). Os picos menos intensos de safirina parecem indicar que a sinterização se processa para completa cristalização da fase  $\alpha$ -cordierita [28]. Adicionalmente, os padrões de DRX mostram a ausência de alumina nessa temperatura de sinterização, possivelmente indicando sua completa dissolução no meio reacional em conjunto com a decomposição de outras fases com o progresso da sinterização, favorecendo assim a formação da fase  $\alpha$ -cordierita.

Resultados similares foram encontrados por Ogiwara et al [9], os quais obtiveram a fase  $\alpha$ -cordierita à 1170 °C em conjunto com safirina e cristobalita. Entretanto, a síntese foi realizada mediante o uso de óxidos puros, o que torna o processo relativamente mais caro. Em contrapartida, no presente trabalho foram utilizadas matérias-primas de baixo custo como argila e talco.

Estudos realizados por Njoya et al [8] permitiram a obtenção da fase  $\alpha$ -cordierita a partir de massas cerâmicas com composições químicas próximas às encontradas neste trabalho. Entretanto foram utilizadas temperaturas mais elevadas, especificamente em torno de 1300 °C. Essa diferença se dá a partir da composição química de ambas as pesquisas. A massa cerâmica estudada no presente trabalho, como apresentado na análise química da massa cerâmica C0, apresenta uma maior quantidade de óxidos fundentes, destacando-se o teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Este óxido pode promover a cristalização da cordierita a partir de mudanças na energia de ativação dessa fase no sistema  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  [46]. A influência deste óxido no mecanismo de cristalização da cordierita tem sido continuamente estudada por outros pesquisadores [29,47-49].

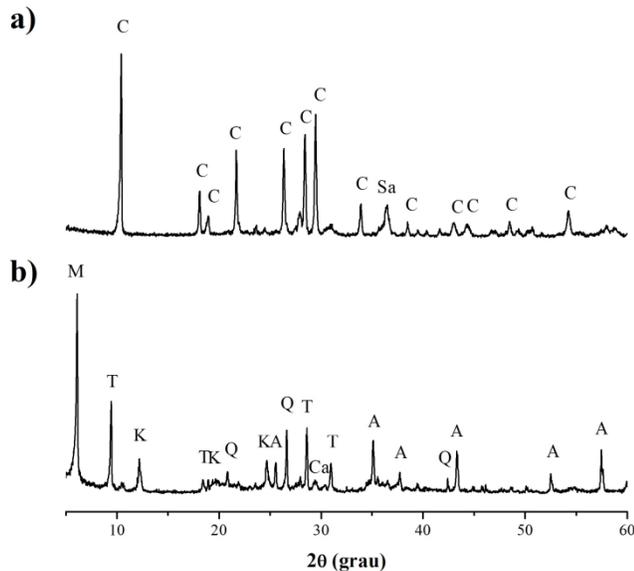


Figura 2. Composição mineralógica do chamote (a) e da massa cerâmica C0 (b). A – alumina; C –  $\alpha$ -cordierita; Ca – calcita; K – caulinita; M – montmorilonita; Q – quartzo; T – talco; Sa – safirina.

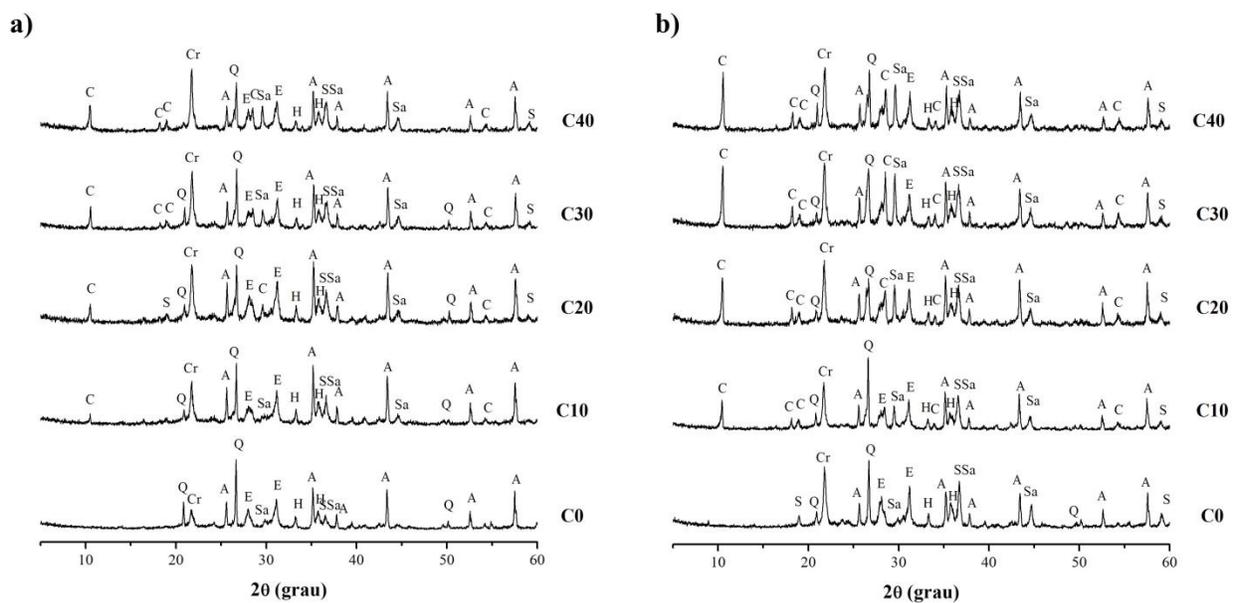


Figura 3. Padrões de DRX das amostras sinterizadas à (a) 1050 e (b) 1100 °C. A – alumina; C –  $\alpha$ -cordierita (indialita); Cr – cristobalita; E – enstatita; H – hematita; Q – quartzo; S – espinelio; Sa – safirina.

A Figura 3 apresenta os padrões de DRX das composições estudadas e sinterizadas à 1050 e 1100 °C, respectivamente. À 1050 °C, as fases identificadas foram  $\alpha$ -cordierita, cristobalita ( $\text{SiO}_2$ ) (JCPDS 82-0512), enstatita ( $\text{MgSiO}_3$ ) (JCPDS 19-0768), espinélio ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) (JCPDS 35-0310), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (JCPDS 89-8104), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e safirina ( $4\text{MgO} \cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ).

A decomposição do talco favoreceu a formação da fase enstatita [8,26], e a sílica amorfa gerada durante os tratamentos térmicos deu origem a cristobalita. A fase safirina possivelmente surgiu em virtude das reações entre a sílica amorfa, alumínio e óxido de magnésio. A fase espinélio surge devido a interação entre os íons de Al e Mg dispersos na fase líquida [7]. Foi observado também a presença de hematita que está relacionada ao teor de ferro presente na mistura.

Analisando esses resultados, verificou-se que não houve diferença mineralógica entre as amostras com o aumento da temperatura. No entanto, os picos de algumas fases se apresentam mais intensos, possivelmente indicando maior quantidade de fases cristalinas.

Os picos intensos e fortes de cordierita são observados quando o teor de chamote é aumentado. É importante observar que o aumento na temperatura de 1050 para 1100 °C favoreceu a formação dessa fase. Provavelmente, o espinélio está sendo consumido em conjunto com outras fases. Segundo alguns pesquisadores [4], a formação da cordierita pode ocorrer por dois mecanismos: difusão dos cátions de Al e Mg na fase rica em sílica ou por reação em estado sólido entre o espinélio e a sílica amorfa. De acordo com os resultados apresentados, a presença de espinélio parece indicar a formação da cordierita a partir desta reação.

A Tabela 3 apresenta os resultados referentes a retração linear, densidade, absorção de água e porosidade aparente. Pode-se observar que essas propriedades foram pouco influenciadas pela temperatura de queima e pelo teor do chamote. Não foi observado diferença significativa entre as amostras.

Tabela 3. Resultados das propriedades físicas das amostras sinterizadas.

Composição	Temperatura (°C)	RL <sup>a</sup> (%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	AA <sup>b</sup> (%)	PA <sup>c</sup> (%)
C0	1050	2,1±0,0	1,8±0,0	23,9±0,8	42,2±0,8
	1100	2,9±0,0	1,8±0,0	21,3±0,6	39,2±0,7
C10	1050	2,2±0,1	2,0±0,0	16,7±1,1	33,5±1,9
	1100	2,4±0,0	2,0±0,0	15,8±0,4	32,0±0,6
C20	1050	1,7±0,2	1,7±0,0	19,3±0,7	36,6±1,0
	1100	1,9±0,1	2,0±0,0	16,5±1,0	32,6±1,4
C30	1050	1,6±0,0	2,0±0,0	16,5±1,0	32,9±1,4
	1100	1,5±0,1	2,0±0,0	18,5±0,5	35,4±0,6
C40	1050	0,9±0,0	1,9±0,0	18,3±0,4	34,1±0,5
	1100	0,8±0,0	1,8±0,0	24,0±2,2	42,1±0,5

<sup>a</sup>Retração linear; <sup>b</sup>Absorção de água; <sup>c</sup>Porosidade aparente.

A retração linear aumentou levemente com a elevação da temperatura para as amostras C0, C10 e C20, enquanto para as amostras com teores mais elevados de chamote como nas amostras C30 e C40, foi observado redução na retração das peças cerâmicas. Pode-se observar que a densidade não variou significativamente entre as temperaturas. Analisando esses resultados, verifica-se que o aumento no teor de chamote promoveu a diminuição na retração das peças cerâmicas. Isso pode ser atribuído a presença de algumas partículas de granulometria mais grosseira que dificultou o empacotamento das partículas e a sua sinterização por fase líquida [33].

Os valores de absorção de água e porosidade aparente se apresentaram decrescentes com o aumento da temperatura para as amostras C0, C10 e C20. Para as amostras C30 e C40, foi observado o contrário, ou seja, melhoria na absorção de água e consequentemente na porosidade aparente com o aumento da temperatura. Entretanto, não houve variações significativas quando se compara com os resultados das

amostras sem chamote. Esses resultados mostram que composições com maiores teores de chamote parecem contribuir na porosidade das peças cerâmicas. Provavelmente, a presença de vazios entre as partículas do chamote podem ter atuado como poros. Comportamento similar foi observado por Vieira et al [34], ao estudarem a incorporação de chamote da construção civil em formulações contendo argilas. Outros pesquisadores [30] também observaram que a adição do chamote pode contribuir na porosidade de cerâmicas.

As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura estão apresentadas na Figura 4a-e e mostram as superfícies de fraturas das amostras sinterizadas à 1100 °C. As superfícies de fratura se apresentam rugosas com agregados de grãos envoltos de fase vítrea. Verifica-se a presença de alguns poros com formatos variados e interconectados, distribuídos ao longo das secções transversais. Analisando essas imagens, as microestruturas parecem não apresentar diferença entre as amostras no que se refere a

porosidade. No entanto, essas imagens não permitem estimar com precisão o tamanho dos poros.

Na Figura 4f, observa-se a imagem da morfologia da cordierita sintetizada à 1175 °C. Verifica-se que a cordierita apresenta uma morfologia tipicamente no formato de placas hexagonais. De acordo com a literatura [50], essa morfologia

é característica da indialita, umas das formas polimórficas estáveis da cordierita. Esta morfologia também foi observado por outros pesquisadores [12], os quais estudaram a obtenção de cordierita a partir de matérias-primas naturais utilizando o processo de sinterização.

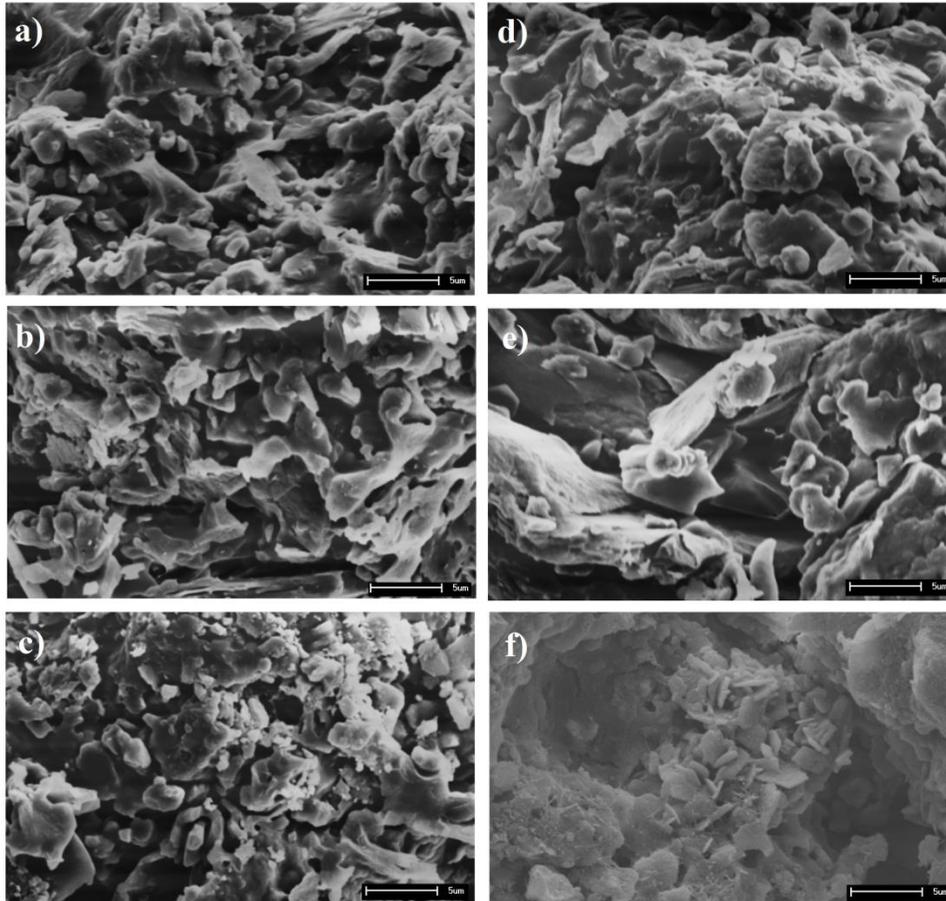


Figura 4. Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da secção transversal das amostras (a) C0-1100, (b) C10-1100, (c) C20-1100, (d) C30-1100, (e) C40-1100 e (f) C0-1175.

A Figura 5 mostra o comportamento mecânico das amostras sinterizadas. Pode-se observar que os módulos de ruptura à flexão se apresentaram crescentes com o aumento da temperatura para cada composição. Os maiores valores foram encontrados nas amostras C10 sinterizadas à 1050 e 1100 °C, os quais se apresentaram equivalentes a  $10,2 \pm 0,8$  e  $12,6 \pm 0,9$  MPa, respectivamente. Já os menores valores foram observados nas amostras C40, apresentando  $5,3 \pm 0,3$  e  $7,4 \pm 1,3$  MPa quando sinterizadas à 1050 e 1100 °C, respectivamente.

Comparando as amostras com diferentes teores de chamote, verifica-se que há um ganho na resistência mecânica nas amostras com adições de até 10% em peso de chamote. Para adições subsequentes de chamote, tendo em vista as amostras C20 e C30, os módulos de ruptura à flexão começam a diminuir. No entanto, estes valores ainda são mais elevados quando comparados com as composições trabalhadas sem chamote.

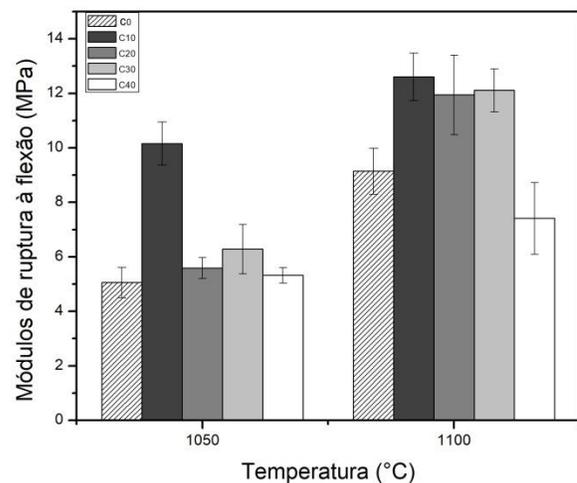


Figura 5. Módulos de ruptura à flexão.

Analisando esses resultados, a adição de até 40% em peso de chamote favorece a diminuição na resistência mecânica das peças cerâmicas. Estas amostras atingiram um dos valores mais baixo. Provavelmente, partículas de granulometria grosseira presentes no chamote dificilmente aderiram à massa cerâmica, tornando-se pontos de concentração de tensão [33], razão esta que pode ter levado a menor resistência mecânica.

Analisando todos esses resultados, fica evidenciada a relação entre a temperatura de sinterização e o teor de chamote com o comportamento mecânico das composições estudadas. Esses resultados corroboram com os dados apresentados anteriormente.

## Conclusões

Este trabalho permitiu a obtenção da fase  $\alpha$ -cordierita (indialita) a partir da sinterização de misturas contendo argila *ball clay*, alumina e talco à 1175 °C. Os resultados indicaram que a porosidade aparente das peças cerâmicas foram pouco influenciadas pelo teor de chamote, pois as variações não foram muito significativas. A adição de até 10% de chamote nas formulações promoveu melhoria no comportamento mecânico. Entretanto, a adição de teores mais elevados de chamote pode contribuir na diminuição da retração de peças cerâmicas. Portanto, esses resultados indicam a importância do controle do teor de chamote e da temperatura de queima para a obtenção de cerâmicas porosas. De acordo com este estudo, conclui-se que essas composições estudadas apresentam potencial para serem utilizadas na produção de cerâmicas porosas voltadas para processos de separação por membranas.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES (bolsista Mykaell Y. M. Souza) e ao CNPq (proc. 304643/2015-7 e 308912/2016-0) pelo o apoio financeiro e ao Laboratório de Tecnologia dos Materiais da Universidade Federal de Campina Grande.

## Referências

- [1] González-Velasco, J. R., Ferret, R., López-Fonseca, R., Gutiérrez-Ortiz, M. A., Influence of particle size distribution of precursor oxides on the synthesis of cordierite by solid-state reaction. *Powder Technology*, 153, 34–42, 2005.
- [2] Ghitulica, C., Andronescu, E., Nicola, O., Dicea, A., Birsan, M., Preparation and characterization of cordierite powders. *Journal of the European Ceramic Society*, 27, 711–713, 2007.
- [3] Goren, R., Gocmez, H., Ozgur, C., Synthesis of cordierite powder from talc, diatomite and alumina. *Ceramics International*, 32, 407-409, 2006.
- [4] Al-Harbi, O. A., Ozgur, C., Khan, M. M., Fabrication and characterization of single phase cordierite honeycomb monolith with porous wall from natural raw materials as catalyst support. *Ceramics International*, 41, 3526-3532, 2015.
- [5] Wang, T., Yang, S., Sun, K., Fang, X., Preparation of Pt/beta zeolite–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/cordierite monolith for automobile exhaust purification. *Ceramics International*, 37, 621-626, 2011.
- [6] Zhang, F., Qi, C-X., Wang, S., Liu, J., Cao, H., A study on preparation of cordierite gradient pores porous ceramics from rectorite. *Solid State Sciences*, 13, 929-933, 2011.
- [7] Majumder, M., Mukhopadhyay, S., Parkash, O., Kumar, D., Sintering and crystallisation behaviour of chemically prepared cordierite for application in electronic packaging. *Ceramics International*, 30, 1067-1070, 2004.
- [8] Njoya, D., Elimbi, A., Fouejio, D., Hajjaji, M., Effects of two mixtures of kaolin-talc-bauxite and firing temperatures on the characteristics of cordierite-based ceramics. *Journal of Building Engineering*, 8, 99-106, 2016.
- [9] Ogiwara, T., Noda, Y., Shoji, K., Kimura, O., Solid state synthesis and its characterization of high density cordierite ceramics using fine oxide powders. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 118, 246-249, 2010.
- [10] Labrincha, J. A., Albuquerque, C. M., Ferreira, J. M., Ribeiro, M. J., Electrical characterisation of cordierite bodies containing Al-rich anodising sludge. *Journal of the European Ceramic Society*, 26, 825-830, 2006.
- [11] Obradović, N., Filipović, S., Đorđević, N., Kosanović, D., Marković, S., Pavlović, V., Olčan, D., Djordjević, A., Olčan, D., Djordjević, A., Kachlik, M., Maca, K. Effects of mechanical activation and two-step sintering on the structure and electrical properties of cordierite-based ceramics. *Ceramics International*, 42, 13909–13918, 2016.
- [12] Almeida, E. P., Brito, I. P., Ferreira, H. C., Lira, H. L., Santana, L. N. L., Neves, G. A., Cordierite obtained from compositions containing kaolin waste, talc and magnesium oxide. *Ceramics International*, 44, 1719-1725, 2017.
- [13] Boccaccini D. N., Leonelli C., Rivasi M. R., Romagnoli M., Boccaccini A. R., Microstructural investigations in cordierite–mullite refractories. *Ceramics International*, 31, 417-432, 2005.
- [14] Naga S. M., Sayed M., Elmaghraby H. F., Khalil M. S., Fabrication and properties of cordierite/anorthite composites. *Ceramic International*, 43, 6024-6028, 2017.
- [15] Rao E. S., Manohar P., Processing Research Effect of particle size on high purity cordierite for kiln furniture applications. *Ceramamic Processing Research*, 17, 448-453, 2016.
- [16] Silva F. A., Lira H. L., Preparação e caracterização de membranas cerâmicas de cordierita. *Cerâmica*, 52, 276-282, 2006.

- [17] Dong Y., Liu X., Ma Q., Meng G., Preparation of cordierite-based porous ceramic micro-filtration membranes using waste fly ash as the main raw materials. *Journal of Membrane Science*, 285, 173-181, 2006.
- [18] Dong Y., Feng X., Dong D., Wang S., Yang J., Gao J., Liu X., Menget G., Elaboration and chemical corrosion resistance of tubular macro-porous cordierite ceramic membrane supports. *Journal of Membrane Science*, 304, 65-75, 2007.
- [19] Dong Y., Lin B., Wang S., Xie K., Fang D., Zhang X., Dinget H., Liu X., Meng G., Cost-effective tubular cordierite micro-filtration membranes processed by co-sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, 477, L35-L40, 2009.
- [20] Menchi A. M., Scian A. N., Mechanism of cordierite formation obtained by the sol – gel technique. 59, 2664-2667, 2005.
- [21] Hwang S-P., Wu J-M., Effect of Composition on Microstructural Development in MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glass-ceramics. *American Ceramic Society*, 84, 1108-1112, 2001.
- [22] Nadafan M., Malekfar R., Dehghani Z., Khorrani G. H., Synthesis and analysis of optical properties of cordierite nanopowder prepared by the pechini method. *Procedia Materials Science*, 11, 331-335, 2015.
- [23] Awano M., Takagi H., Kuwahara Y., Grinding effects on the synthesis and sintering of cordierite. *Journal of the American Ceramic Society*, 75, 2535-40, 1992.
- [24] Jean J-H., Gupta T. K., Liquid-phase sintering in the glass-cordierite system. *Journal of Materials Science*, 27, 1575-1584, 1992.
- [25] Kuscer D., Bantan I., Hrovat M., Malič B., The microstructure, coefficient of thermal expansion and flexural strength of cordierite ceramics prepared from alumina with different particle sizes. *Journal of the European Ceramic Society*, 37, 739-746, 2017.
- [26] Benhammou A., Hafiane Y. El., Abourriche A., Abouliatim Y., Nibou L., Yaacoubi A., Tessier-Doyen N., Smith, A., Tanouti, B., Influence of sintering temperature on the microstructural and mechanical properties of cordierite synthesized from andalusite and talc. *Materials Letters*, 172, 198-201, 2016.
- [27] Gökçe H., Ağaoğulları D., Öveçoğlu M. L., Duman I., Boyraz T., Characterization of microstructural and thermal properties of steatite/cordierite ceramics prepared by using natural raw materials. *Journal of the European Ceramic Society*, 31, 2741-2747, 2011.
- [28] Li Y., Qian H., Cheng X., Zhang R., Zhang H., Fabrication of dense cordierite ceramic through reducing Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mole ratio. *Materials Letters*, 116, 262-264, 2014.
- [29] García E., Gancedo J. R., Gracia M., Effect of cycled combustion ageing on a cordierite burner plate. *Materials Characterization*, 61, 1147-1156, 2010.
- [30] Djangang C. N., Elimbi A., Melo U. C., Lecomte G. L., Nkoumbou C., Soro J. P., Blanchart, P., Njopwouo D., Sintering of clay-chamotte ceramic composites for refractory bricks. *Ceramics International*, 34, 1207-1213, 2008.
- [31] Zouaoui H., Bouaziz J., Performance enhancement of the ceramic products by adding the sand, chamotte and waste brick to a porous clay from Bir Mcherga (Tunisia). *Applied Clay Science*, 143, 430-436, 2017.
- [32] Zouaoui H., Bouaziz J., Physical and mechanical properties improvement of a porous clay ceramic. *Applied Clay Science*, 150, 131-137, 2017.
- [33] Vieira C. M. F., Teixeira S. S., Monteiro S. N., Efeito da temperatura de queima nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha contendo chamote. *Cerâmica*, 55, 332-336, 2009.
- [34] Vieira C. M. F., Monteiro S. N., Effect of grog addition on the properties and microstructure of a red ceramic body for brick production. *Construction and Building Materials*, 21, 1754-1759, 2007.
- [35] Dutra R. P. S., Pontes L. R. A., Obtenção e análise de cerâmicas porosas com a incorporação de produtos orgânicos ao corpo cerâmico. *Cerâmica*, 48, 223-230, 2002.
- [36] Ohji T., Fukushima M., Macro-porous ceramics: processing and properties. *International Materials Reviews*. 57, 115-131, 2012.
- [37] Menezes R. R., Ferreira H. S., Neves G. A., Ferreira H. C., Caracterização de argilas plásticas do tipo “ball clay” do litoral paraibano. *Cerâmica*, 49, 120-127, 2003.
- [38] Jiang F., Li Y., Zhao L., Cang D., Novel ceramics prepared from inferior clay rich in CaO and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Properties, crystalline phases evolution and densification process. *Applied Clay Science*, 143, 199-204, 2017.
- [39] Zhao L., Li Y., Zhou Y., Cang D., Preparation of novel ceramics with high CaO content from steel slag. *Materials and Design*, 64, 608-613, 2014.
- [40] Souza A. E., Teixeira S. R., Santos G. T. A., Longo E., Addition of sedimentary rock to kaolinitic clays: influence on sintering process. *Cerâmica*, 59, 147-155, 2013.
- [41] Xu, X., Lao, X., Wu, J., Zhang, Y., Xu, X., Li, K., Microstructural evolution, phase transformation, and variations in physical properties of coal series kaolin powder compact during firing. *Applied Clay Science*, 115, 76–86, 2015.
- [42] Kurama, S., Ozel, E., The influence of different CaO source in the production of anorthite ceramics. *Ceramics International*, 35, 827-830, 2009.
- [43] Ren, X. Z., Zhang, W., Zhang, Y., Zhang, P. X., Liu, J. H., Effects of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content on microstructure and mechanical properties of CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system.

Transactions on Nonferrous Metals Society of China, 25, 137-145, 2015.

- [44] Baccour H., Medhioub M., Jamoussi F., Mhiri T., Influence of firing temperature on the ceramic properties of Triassic clays from Tunisia. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 2812-2817, 2009.
- [45] Santos, R. C., Silva, T. R., Neves, G. A., Macedo, R. S., Menezes, R. R., Santana, L. N. L., Interação entre características de argilas e parâmetros de processamento sobre propriedades tecnológicas de corpos cerâmicos. *Cerâmica* 63, 361-368, 2017.
- [46] Wang S., Effects of Fe on crystallization and properties of a new high infrared radiance glass-ceramics. *Environmental Science and Technology*, 44, 4816-4820, 2010.
- [47] Wang S. M., Kuang F. H., Yan Q. Z., Ge C. C., Qi L. H., Crystallization and infrared radiation properties of iron ion doped cordierite glass-ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 2819-2823, 2011.
- [48] Liu C., Liu L., Tan K., Zhang L., Tang K., Shi X., Fabrication and characterization of porous cordierite ceramics prepared from ferrochromium slag. *Ceramics International*, 42, 734-742, 2016.
- [49] Miyashiro A., Iiyama T., Yamasaki M., Miyashiro T., The Polymorphism of cordierite and indialite, *American Journal of Science*. 253, 185-208, 1955.
- [50] Ohsato H., Kim J., Cheon C., Kagomiya I., Crystallization of indialite/cordierite glass ceramics for millimeter-wave dielectrics. *Ceramics International*, 41, S588-S593, 2015.