

## Viabilidade da Fabricação de Porcelanatos Via Seca a Partir de Massas de Cor de Queima Clara. Parte I: Condições de Moagem e Homogeneização da Massa

**Fábio Gomes Melchiadès<sup>a,b\*</sup>, Máisa T. Daros<sup>a</sup>,  
Fernanda C. Zanelato<sup>a</sup>, Anselmo O. Boschi<sup>a,b</sup>**

<sup>a</sup>Laboratório de Revestimentos Cerâmicos – LaRC, Departamento de Engenharia de Materiais – DEMA, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Rod. Washington Luiz, Km 235, CEP 13565-905, São Carlos, SP, Brasil

<sup>b</sup>Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Rod. Washington Luiz, Km 235, CEP 13565-905, São Carlos, SP, Brasil

\*e-mail: daob@ufscar.br

**Resumo:** Os porcelanatos apresentaram altas taxas de crescimento de produção e consumo no Brasil e no mundo na última década e possuem valor agregado mais elevado, dentre as tipologias de revestimentos cerâmicos fabricadas atualmente. Ainda que mais de 70% da produção brasileira de revestimentos cerâmicos seja fabricada pelo processo via seca, os porcelanatos são produzidos quase que exclusivamente por via úmida no Brasil e no mundo. Considerando as vantagens meio ambientais e econômicas do processo via seca, este trabalho teve por objetivo contribuir para a viabilização da fabricação de porcelanatos esmaltados a partir de massas de cor de queima clara, através do processo via seca. Para isso, foram estudadas as condições mais adequadas para a preparação da massa e posteriormente analisadas as possibilidades que se configuram para a formulação de massas destinadas a este processo. Ao final do trabalho, conclui-se a respeito do potencial técnico deste produto e são apresentadas as condições de processamento mais adequadas para sua viabilização em escala industrial. Nesta primeira parte do trabalho, encontram-se os resultados referentes à moagem e homogeneização da massa.

**Palavras-chaves:** *porcelanatos, via seca, meio ambiente e granulometria.*

### 1. Introdução

A tecnologia de preparação de massas por via seca pode ser considerada a maior inovação tecnológica ocorrida no setor de revestimentos cerâmicos no Brasil<sup>1</sup>. Paralelamente, nos últimos cinco anos a fabricação de porcelanatos no Brasil experimentou grande crescimento, seguindo a tendência mundial de diversificação da produção do setor<sup>2</sup>. A combinação das propriedades técnicas deste produto com o poder da marca “porcelanato” viabilizou o desenvolvimento de produtos cerâmicos de maior valor agregado, os quais têm apresentado boa penetração em segmentos do mercado que não eram atingidos pelos revestimentos cerâmicos tradicionais.

Historicamente, as tecnologias utilizadas para a fabricação de revestimentos cerâmicos no Brasil foram importadas dos tradicionais produtores europeus de revestimentos cerâmicos, que utilizam primordialmente a tecnologia via úmida para a preparação de massas. Entretanto, o crescimento observado nos últimos anos da produção brasileira de revestimentos cerâmicos está associado com o aprimoramento da tecnologia de fabricação através da rota denominada via seca<sup>1</sup>. Esta tecnologia foi inicialmente utilizada na Europa para a fabricação de produtos de acabamento rústico, sendo pouco aproveitada neste continente para a fabricação de revestimentos cerâmicos esmaltados convencionais. No Brasil, por sua vez, estima-se que mais de 70% dos revestimentos cerâmicos fabricados atualmente sejam produzidos por meio da tecnologia via seca.

A principal vantagem da fabricação de revestimentos cerâmicos por via seca está na maior sustentabilidade dos produtos fabricados por esta rota, a qual se configura expressivamente menos danosa ao meio ambiente em comparação com a rota via úmida. Estudo recente<sup>3</sup> realizado em indústrias cerâmicas brasileiras aponta para um consumo de energia térmica aproximadamente 40% inferior

nas fábricas que utilizam o processo via seca, principalmente em virtude da eliminação da etapa de atomização da massa, existente na rota a úmido. Com relação às emissões atmosféricas, Monfort et al.<sup>4</sup> estimaram que durante a fabricação de revestimentos cerâmicos por via úmida são emitidos aproximadamente 5 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, ao passo que os produtos fabricados por via seca geram pouco mais de 2 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>. Com relação ao uso dos recursos hídricos para a fabricação de revestimentos cerâmicos, ainda não existem dados oficiais disponíveis. Contudo, levando-se em consideração que o processo via úmida envolve a secagem por atomização de suspensões contendo em média 35% de água, estima-se que o processo via seca também seja mais eficiente no que diz respeito ao manejo sustentável dos recursos hídricos.

Ainda que o processo via seca apresente as vantagens citadas, atualmente a totalidade da produção brasileira de porcelanatos de cor de queima clara é fabricada através do processamento a úmido. Existem algumas iniciativas pontuais para a produção de porcelanatos por via seca a partir de argilas vermelhas. Muito embora estes porcelanatos possuam boas propriedades técnicas, sabe-se que o mercado consumidor apresenta certa rejeição por produtos de base muito escura e/ou avermelhada, especialmente tratando-se de produtos de maior valor agregado.

Em vista do grau de desenvolvimento tecnológico e dos avanços obtidos com a preparação de massas por via seca no Brasil, acredita-se que a adaptação desta tecnologia para a fabricação de porcelanatos de cor de queima clara pode ser uma alternativa extremamente interessante para viabilizar um crescimento ainda mais significativo do setor de revestimentos cerâmicos no país.

## 2. Objetivos

Dentro do contexto apresentado acima, o presente trabalho tem por objetivo principal contribuir para a viabilização da fabricação de porcelanatos esmaltados a partir de massas de cor de queima clara, através do processo via seca. Nesta etapa específica do trabalho, os seguintes objetivos específicos foram considerados:

- Avaliar isoladamente a influência da intimidade de mistura e dos tamanhos das partículas sobre as propriedades de massas de porcelanatos preparadas por via seca;
- Determinar as reduções de tamanhos de partículas necessárias na moagem a seco para a obtenção de porcelanatos de cor de queima clara e boas características técnicas; e
- Identificar os ajustes necessários nos sistemas de moagem via seca atualmente utilizados no setor cerâmico brasileiro, de forma a viabilizar a preparação de massas de porcelanato por meio desta rota de processamento.

Os estudos relacionados com a granulação da massa e o desenvolvimento de formulações de massas destinadas a este processo serão apresentados nas Partes II e III deste artigo.

## 3. Procedimento Experimental

### 3.1. Intimidade de mistura × granulometria

Inicialmente uma composição típica de porcelanato esmaltado de cor de queima clara foi preparada em laboratório, utilizando as tecnologias via úmida e via seca, de maneira a reproduzir as condições tipicamente utilizadas em processos industriais que utilizam estas rotas de preparação de massas. Foram selecionadas matérias-primas utilizadas em massas de porcelanato a partir de um conjunto de matérias-primas disponíveis.

Sendo assim, a massa foi preparada por via úmida empregando moagem em moinho de bolas de laboratório com adição de 55% de água e 0,5% de silicato de sódio sobre a massa seca até obtenção de teor de resíduo de 5,0% em peneira ABNT #230 (abertura de 63  $\mu\text{m}$ ).

A mesma massa também foi preparada por via seca, com a moagem realizada em moinho de martelos de laboratório, seguida da posterior desagregação em almofariz até passagem completa pela peneira ABNT #45 (abertura de 350  $\mu\text{m}$ ).

Adicionalmente, uma massa de mesma composição foi preparada por uma rota denominada via mista, através da qual as matérias-primas foram moídas individualmente por via úmida e homogeneizadas por via seca. A moagem individual das matérias-primas por via úmida foi realizada nas mesmas condições descritas anteriormente para a moagem da massa por via úmida. Após a dosagem das matérias-primas na proporção devida, a homogeneização do material já moído foi realizada manualmente, sem adição de água.

A preparação das massas nestas condições permitiu uma avaliação isolada da influência dos efeitos dos tamanhos de partículas e da intimidade de mistura das matérias-primas sobre o comportamento das massas, tendo em vista que a composição preparada pela via mista foi planejada para obter a distribuição de tamanhos de partículas da massa preparada por via úmida, porém com a intimidade de mistura da massa preparada por via seca.

Em resumo, nesta etapa do trabalho, as três massas abaixo descritas foram preparadas e posteriormente caracterizadas comparativamente:

- Via úmida: moagem a úmido em moinho de bolas até obtenção de 95% das partículas com diâmetro inferior a 63  $\mu\text{m}$ ;
- Via seca: moagem a seco até obtenção de 100% das partículas com diâmetro inferior a 350  $\mu\text{m}$ ; e
- Via mista: moagem a úmido individual das matérias-primas em moinho de bolas até obtenção de 95% das partículas com diâmetro inferior a 63  $\mu\text{m}$ . A seguir as suspensões das

matérias-primas foram secas, dosadas para gerar a mesma composição das outras duas massas e misturadas manualmente por via seca.

Após a moagem, todas as massas foram granuladas em peneiras de laboratório com 7,0% de umidade, forçando a passagem dos aglomerados obtidos por peneiras com aberturas de 1,0 mm de diâmetro. As massas granuladas repousaram por 24 horas para a homogeneização da umidade utilizada para a granulação e posteriormente foram caracterizadas através das seguintes análises:

- Distribuição de tamanhos de partículas: realizada através da técnica de sedimentação, em equipamento analisador de partículas Sedigraph 5000d, com os resultados complementados através de análises de peneiramento a úmido;
- Diagramas de compactação: foram prensados corpos de prova com pressão de compactação variável, de forma a manter fixa a densidade aparente dos corpos de prova após a secagem das três composições ( $D_{ap} = 1,90 \text{ g/cm}^3$ );
- Módulo de ruptura à flexão após secagem: os corpos de prova obtidos a partir de pressões variáveis para a obtenção de mesma densidade aparente nas três massas foram caracterizados mecanicamente através do ensaio de flexão em três pontos em flexímetro Nannetti CC-96-2006; e
- Curvas de gresificação: O comportamento das massas durante a queima foi avaliado por meio da determinação da variação da absorção de água e da retração linear de queima em distintas temperaturas de sinterização. As queimas foram realizadas em forno Maitec FSQC-1300 em ciclos de queima com duração total aproximada de 45 minutos, com taxas de aquecimento de 50  $^{\circ}\text{C/min}$ , 5 minutos na temperatura máxima do ciclo de queima e resfriamento forçado 50  $^{\circ}\text{C/min}$ .

A seguir, as massas foram caracterizadas comparativamente. Para isso, foram prensados corpos de prova com pressão de compactação variável, de forma a manter fixa a densidade aparente dos corpos de prova após a secagem das três composições ( $D_{ap} = 1,90 \text{ g/cm}^3$ ).

Os corpos de prova foram secos em estufa elétrica e posteriormente queimados em diferentes temperaturas em ciclos da ordem de 45 minutos para a obtenção dos diagramas de gresificação.

### 3.2. Efeitos da granulometria (moagem via seca)

A mesma massa utilizada na etapa anterior do trabalho (Tabela 1) foi preparada em laboratório por moagem a seco em distintas granulometrias. A moagem novamente foi realizada em moinho de martelos e auxiliada por almofariz e pistilo, de forma a produzir as seguintes características granulométricas a partir da mesma composição química:

Tabela 1. Composição química da massa utilizada.

Óxidos (%)	Massa de porcelanato
P.F.	4,48
SiO <sub>2</sub>	68,45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,32
TiO <sub>2</sub>	0,78
CaO	0,60
MgO	2,36
Na <sub>2</sub> O	1,67
K <sub>2</sub> O	2,30
MnO	0,04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14
BaO	0,05

- 100% passante em peneira ASTM #45 (abertura de 350  $\mu\text{m}$ );
- 100% passante em peneira ASTM #80 (abertura de 180  $\mu\text{m}$ );
- 100% passante em peneira ASTM #140 (abertura de 105  $\mu\text{m}$ ); e
- 100% passante em peneira ASTM #230 (abertura de 63  $\mu\text{m}$ ).

As distribuições de tamanhos de partículas obtidas por cada uma destas massas foram caracterizadas por sedimentometria de raios-X e peneiramento a úmido.

A seguir, o comportamento destas massas foi avaliado por meio de corpos de prova prensados com pressão de compactação variável de forma a obter densidade aparente fixa em 1,90  $\text{g/cm}^3$ . Tais corpos de prova foram queimados em distintas temperaturas (ciclos de 45 minutos) para a avaliação da fusibilidade através das curvas de gresificação.

Para complementar a análise da influência da distribuição granulométrica das massas moídas por via seca, avaliou-se também o coeficiente de expansão térmica e o índice de piroplasticidade destas massas, queimadas em suas respectivas temperaturas de máxima densificação.

## 4. Análise e Discussão dos Resultados

### 4.1. Intimidade de mistura $\times$ granulometria

A Tabela 1 indica a composição química da massa utilizada no trabalho. Como pode ser verificado pela análise dos teores de óxidos cromóforos, trata-se de uma massa de porcelanato de cor de queima clara, de mesma composição dos porcelanatos fabricados atualmente no Brasil pelo processo via úmida.

A Figura 1 apresenta as curvas de distribuição de tamanhos de partículas das massas preparadas através das três rotas anteriormente descritas. Como esperado, as massas preparadas pelas vias úmida e “mista” apresentam distribuições de tamanhos de partículas muito semelhantes, tendo em vista que foram moídas pelo mesmo processo, com a única diferença que as matérias-primas foram moídas individualmente no caso da massa denominada “via mista”. A massa preparada por via seca, por sua vez, apresenta distribuição de tamanho de partículas consideravelmente mais larga, com participação bem mais expressiva de partículas de diâmetros maiores. A distribuição de tamanhos de partículas da massa via seca reproduz bem as curvas granulométricas das massas moídas por via seca utilizadas para a fabricação de revestimentos cerâmicos semi-porosos no Brasil, onde normalmente encontra-se de 30 a 40% de partículas com diâmetros superiores a 63  $\mu\text{m}$ .

Na Tabela 2 encontram-se os resultados das análises realizadas com os corpos de prova prensados sob pressões de compactação variáveis, buscando obter densidades aparentes similares nas três composições envolvidas nesta etapa do estudo. São apresentadas as pressões de compactação utilizadas, as densidades aparentes obtidas nos corpos de prova e os módulos de ruptura à flexão obtidos nos corpos de prova após secagem a 110  $^{\circ}\text{C}$ .

Como pode ser verificado, as massas apresentam diferentes comportamentos durante a prensagem. A massa preparada por via seca necessita de pressões de compactação muito mais baixas para obter a mesma densidade aparente das outras duas massas. Entretanto, o módulo de ruptura à flexão desta mesma massa é mais baixo em

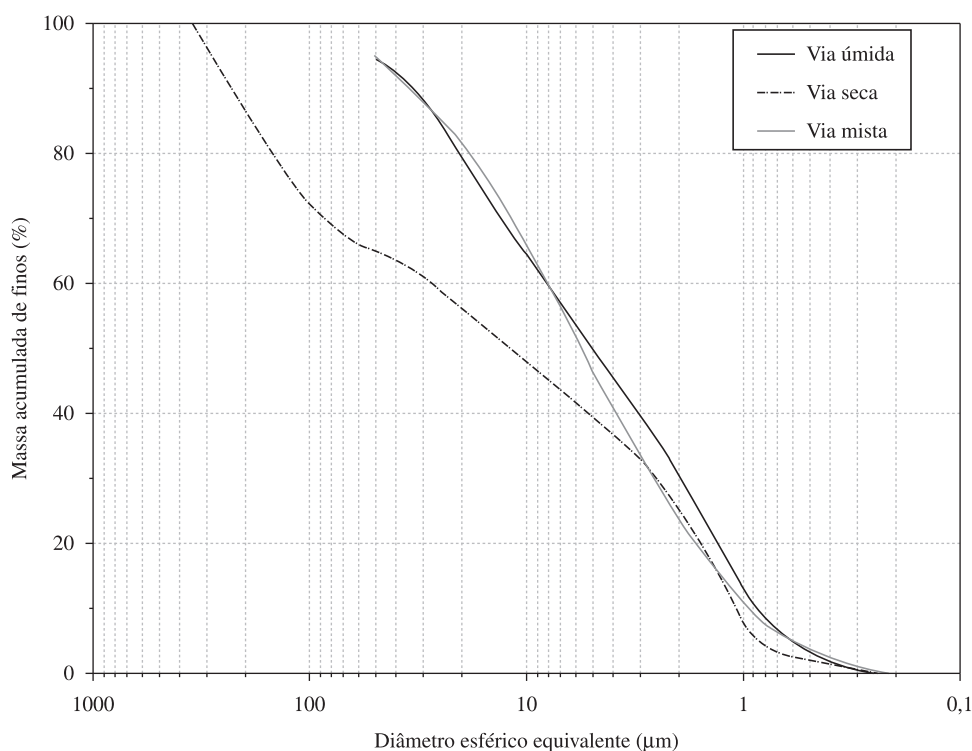


Figura 1. Distribuições de tamanhos de partículas das massas preparadas por rotas distintas.

Tabela 2. Características dos corpos de prova antes da queima.

Composições	Pressão de compactação ( $\text{kgf/cm}^2$ )	Densidade aparente ( $\text{g/cm}^3$ )	Módulo de ruptura à flexão (MPa)
Via úmida	380	1,95 $\pm$ 0,01	2,0 $\pm$ 0,3
Via seca	200	1,97 $\pm$ 0,01	0,6 $\pm$ 0,2
Via mista	400	1,94 $\pm$ 0,01	1,4 $\pm$ 0,2

relação às demais, mesmo apresentando volume de poros de mesma magnitude.

Por sua vez, a massa denominada via mista apresenta comportamento mais parecido com o comportamento da massa via úmida, cabendo destacar a necessidade de pressões de compactações ligeiramente mais altas para a obtenção da mesma densidade aparente da via úmida e o módulo de ruptura à flexão após secagem mais baixo.

Os resultados obtidos podem ser explicados com base nas distribuições de tamanhos de partículas das massas e em suas intimidades de misturas. A massa via seca apresenta o melhor empacotamento em função de sua distribuição de tamanhos de partículas mais larga, a qual favorece a redução dos espaços vazios entre as partículas durante a prensagem<sup>5,6</sup>. Por esta razão, obtém densidades aparentes elevadas sob baixas pressões de compactação. A massa via mista, provavelmente em virtude da intimidade de mistura mais baixa em relação à massa via úmida, necessita de pressões um pouco mais altas para obter a mesma densidade aparente. A baixa intimidade de mistura desta massa pode dificultar o empacotamento das partículas, tendo em vista que é possível que apresente aglomerados de partículas de tamanhos similares que impedem que as partículas mais finas das argilas penetrem nos espaços vazios deixados entre as partículas maiores.

Os resultados do teste de resistência mecânica à flexão podem ser explicados pela teoria de Griffith<sup>7</sup>, sendo o qual, além do volume de poros, o tamanho do maior defeito na microestrutura de corpos frágeis exerce considerável influência sobre a tensão de ruptura destes materiais. Neste sentido, a massa via seca, ainda que possua volume de poros ligeiramente inferior às outras duas massas, certamente apresenta poros maiores em sua microestrutura verde, em consequência da elevada participação de partículas grosseiras em sua composição. Dada a elevada intimidade de mistura e os reduzidos tamanhos de partículas da massa via úmida, esta amostra deve apresentar a microestrutura verde mais homogênea e com poros de menores dimensões, de modo a apresentar comportamento mecânico superior.

O comportamento durante a queima das três massas envolvidas no estudo foi avaliado mediante o levantamento das curvas de gresificação, cujos resultados são expressos na Figura 2.

Os resultados indicam que a fusibilidade da massa é altamente influenciada pela rota de preparação utilizada. Foram necessárias diferenças superiores a 40 °C na temperatura máxima de queima para a obtenção da mesma absorção de água nas massas de mesma composição química, preparadas por rotas distintas.

Entretanto, as curvas de gresificação das massas preparadas por via úmida e via mista foram bastante semelhantes entre si, indicando que as temperaturas de máximas densificações destas massas são bastante próximas. Por sua vez, a massa preparada por via seca apresentou comportamento mais refratário, exigindo temperaturas de queima tão elevadas para a obtenção da absorção de água necessária para a fabricação de porcelanatos que impediriam a fabricação deste produto em condições economicamente praticáveis do ponto de vista industrial.

Tais resultados indicam que a obtenção de partículas finas durante a moagem por via seca é um requisito consideravelmente mais relevante do que a intimidade de mistura das matérias-primas, no que diz respeito ao processo de vitrificação das massas. A cinética do processo de vitrificação<sup>8,9</sup> que ocorre durante a queima está diretamente relacionada com as áreas superficiais das partículas constituintes das massas, que são determinadas pelos tamanhos e formatos das partículas constituintes. A baixa intimidade de mistura dificulta o contato entre os distintos minerais que compõem a massa, necessário para o desenvolvimento de algumas reações, tais como a formação de eutéticos que aceleram o processo de vitrificação. Entretanto, os resultados obtidos nesta etapa do trabalho, indicaram a preponderância da área superficial das partículas para o desenvolvimento do processo de vitrificação.

Através da análise dos corpos de prova, verificou-se que a intimidade de mistura, avaliada através da comparação dos resultados obtidos entre as massas via úmida e via mista, exerce maior influência sobre o aspecto visual dos corpos após a queima. Como pode ser observado pelos corpos de prova apresentados através de imagem digitalizada na Figura 3, a massa preparada por

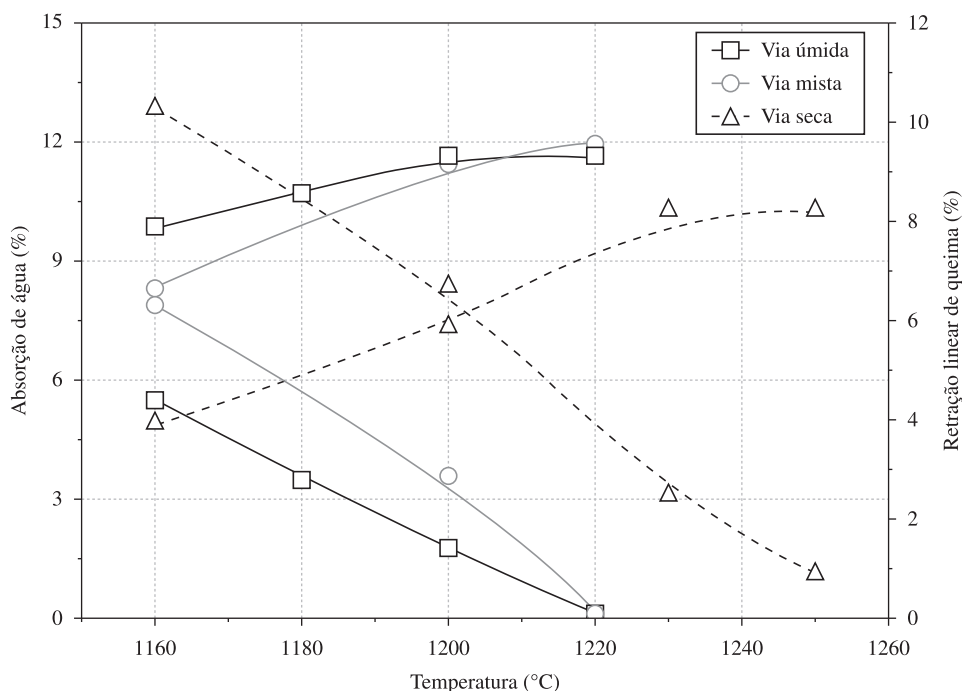


Figura 2. Curvas de gresificação das massas preparadas por rotas distintas.

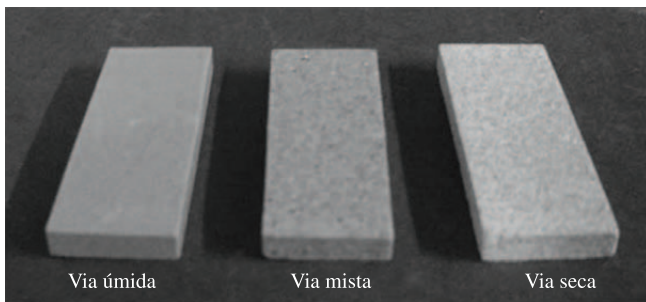


via úmida gerou a obtenção de corpos de prova de aspecto bastante homogêneo e textura menos rugosa após a queima. Por sua vez, os corpos produzidos por via mista muito embora tenham apresentado vitrificação equiparável à via úmida, demonstraram aspecto mais heterogêneo, com pigmentações visíveis a olho nu, além da textura ligeiramente mais grosseira.

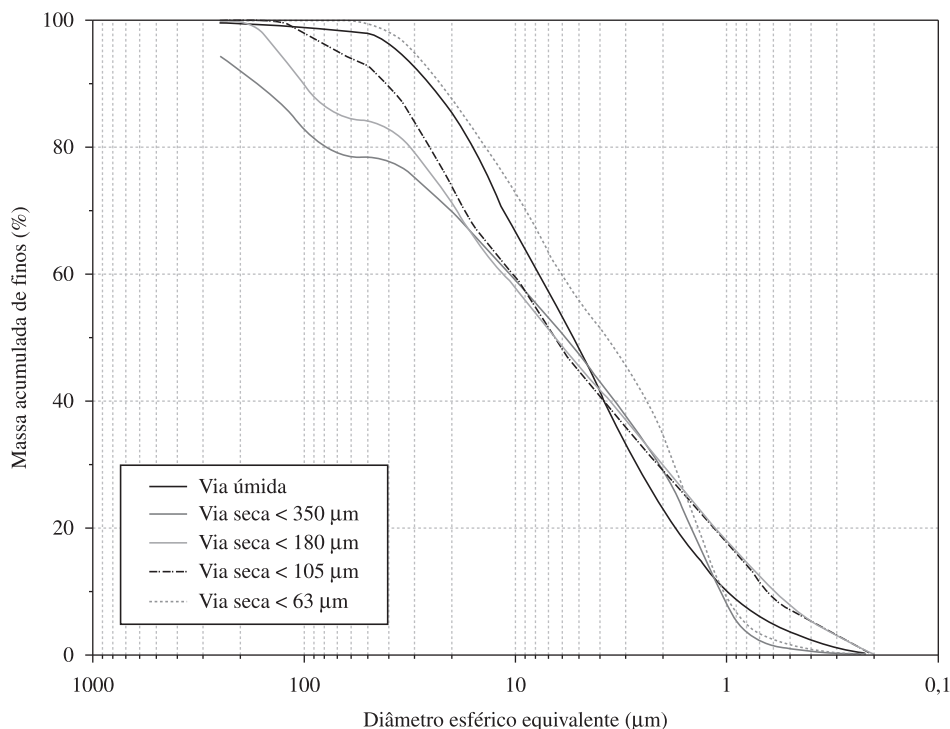
#### 4.2. Efeitos da granulometria (moagem via seca)

Considerando que atualmente as massas industriais de revestimentos cerâmicos preparadas por via seca apresentam frações expressivas de partículas grosseiras (diâmetros superiores a 100  $\mu\text{m}$ ), esta etapa do estudo visou determinar quais seriam as mínimas alterações das condições de moagem por via seca necessárias em relação às condições praticadas atualmente, que pudessem viabilizar a fabricação de porcelanatos de cor de queima clara por esta rota de processamento. Neste sentido, a massa de porcelanato de mesma composição utilizada nos testes descritos no item anterior foi preparada por via úmida e por via seca com distintas distribuições granulométricas, produzidas através de alterações das condições de moagem por via seca em laboratório.

A Figura 4 indica as distribuições de tamanhos de partículas das massas obtidas. Como pode ser apreciado, as massas apresentam



**Figura 3.** Imagem dos corpos de prova das massas após queima nas respectivas temperaturas de máxima densificação.



**Figura 4.** Distribuições de tamanhos de partículas das massas moídas em diferentes condições.

diferenças nos trechos iniciais das curvas granulométricas, onde se concentram as partículas de tamanhos maiores das composições. Dentre as massas preparadas por via seca, somente a composição Via seca < 63  $\mu\text{m}$  se equipara à distribuição de tamanhos de partículas da massa via úmida, especialmente nas frações granulométricas mais grosseiras. As demais massas preparadas por via seca, ainda apresentam participações mais expressivas de partículas grossas em comparação com a massa de mesma composição química preparada através do processo via úmida.

Na Tabela 3 encontram-se os resultados das caracterizações dos corpos de prova antes da queima, incluindo as determinações de densidade aparente e módulo de ruptura de flexão após secagem, bem como as pressões de compactação utilizadas para produzir corpos de prova de densidades similares em todas as composições envolvidas no estudo.

Conforme evidenciado pela Tabela 3, as massas preparadas por via seca com partículas de tamanhos mais finos necessitam de pressões de compactação maiores para produzir corpos de prova de densidades aparentes similares às massas que contém partículas mais grosseiras. Tais resultados, claramente se manifestam em virtude das reduções das amplitudes das distribuições de tamanhos de partículas, observadas à medida que são utilizadas massas com moagens que produzem partículas mais finas. Destaca-se a necessidade de um considerável incremento de pressão de compactação – de 200 a 300  $\text{kgf/cm}^2$  – para produzir corpos de prova das massas Via seca < 63  $\mu\text{m}$  e Via seca < 350  $\mu\text{m}$  com densidades aparentes similares. Entretanto, convém destacar que todas as massas produzidas por via seca ainda necessitaram de pressões de compactação inferiores em relação à massa preparada por via úmida.

Resultados expressivos para a identificação da importância dos tamanhos de partículas para as massas produzidas por via seca foram obtidos nas análises dos módulos de ruptura à flexão após secagem dos corpos de prova obtidos com as diferentes massas utilizadas nesta etapa do estudo. Como pode ser observado pela Tabela 3, nota-se que todas as massas preparadas por via seca apresentaram resistência mecânica à flexão inferior em relação à massa via úmida. Além disso,

diferenças expressivas foram encontradas entre as massas via seca preparadas com distintas granulometrias.

Estes resultados evidenciam a importância das distribuições de tamanhos de partículas e da intimidade de mistura para o comportamento mecânico dos corpos verdes das massas cerâmicas. O fato da massa Via seca < 63 µm ter apresentado módulo de ruptura à flexão inferior em relação à massa Via úmida indica a possibilidade de que sua intimidade de mistura inferior esteja afetando os resultados, provavelmente em virtude da obtenção de uma microestrutura mais heterogênea contendo poros maiores. Em adição, na comparação dos resultados obtidos pelas massas preparadas por via seca verifica-se a influência marcante da redução da participação de frações granulométricas grosseiras sobre o comportamento mecânico dos corpos verdes.

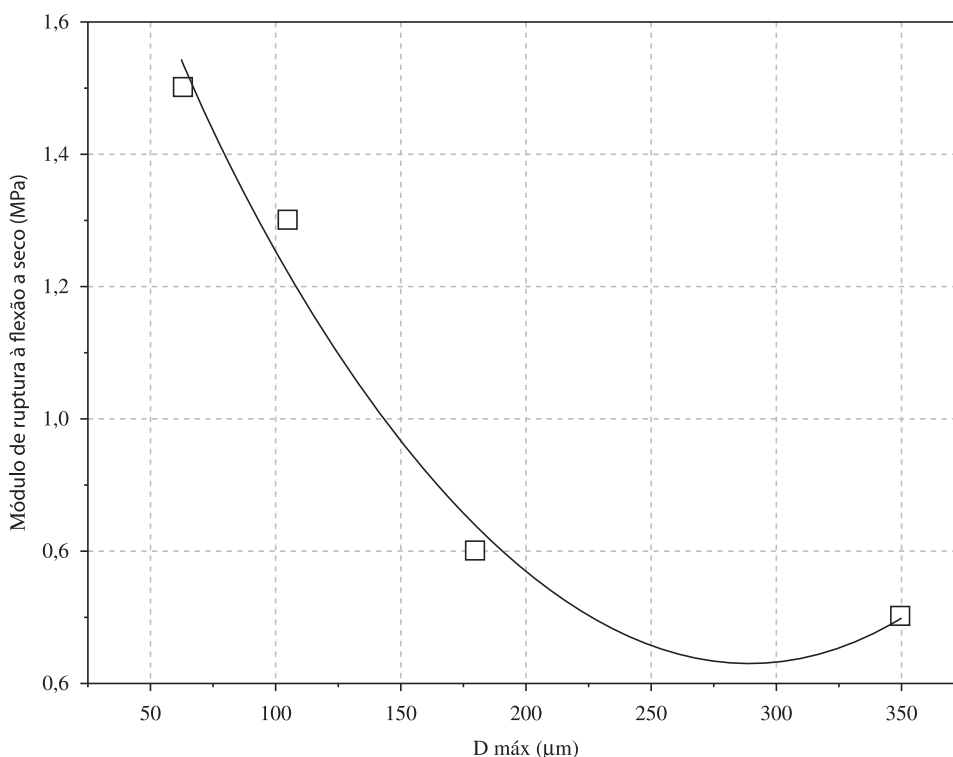
Como pode ser interpretado através da Figura 5, que representa a variação do módulo de ruptura à flexão após secagem em função do diâmetro máximo de partículas (D<sub>máx</sub>) das composições preparadas por via seca, as condições de moagem das massas via seca alteram de maneira marcante o comportamento mecânico dos corpos verdes obtidos. Os resultados indicam ainda, através de uma regressão polinomial, que a redução do diâmetro máximo de partícula produz efeitos pouco expressivos sobre as propriedades mecânicas, quando praticadas entre 350 e 150 µm. Entretanto, efeitos marcantes foram observados quando o diâmetro máximo de partículas é reduzido para valores inferiores a 150 µm.

O comportamento das massas durante a queima foi avaliado através dos diagramas de gresificação representados na Figura 6. Os resultados apontam para a existência de grandes diferenças de velocidade vitrificação entre as massas estudadas. Observa-se que a massa Via seca < 350 µm necessita de temperaturas superiores a 1260 °C para obter absorção de água inferior a 0,5%, que se trata de um requisito necessário para a fabricação de porcelanatos. À medida que o diâmetro máximo de partículas das massas preparadas por via seca é reduzido, a fusibilidade se incrementa até que resultados muito similares ao da massa Via úmida sejam obtidos pela massa Via seca < 63 µm. Estas duas massas atingem absorções de água de porcelanatos em temperaturas de aproximadamente 1200 °C. Estes resultados podem ser explicados pelo aumento da reatividade das massas produzido pelo aumento de área superficial nas composições constituídas por partículas mais finas. Áreas superficiais maiores incrementam os pontos de contato entre as partículas dos distintos minerais presentes na composição e aceleram as reações que favorecem a formação de fases vítreas<sup>9,10</sup>, promovendo a densificação das massas de porcelanato em velocidades maiores e conseqüentemente requisitando temperaturas de queimas mais baixas para a obtenção das características exigidas para esta tipologia de produtos.

As curvas de gresificação apresentadas na Figura 6 demonstram ainda que a máxima retração linear de queima das massas preparadas por via seca também são alteradas em função da granulometria, sendo que os resultados tendem a se aproximar dos resultados da massa

**Tabela 3.** Características dos corpos de prova antes da queima.

Composições	Pressão de compactação (kgf/cm <sup>2</sup> )	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de ruptura à flexão (MPa)
Via úmida	380	1,95 ± 0,01	2,0 ± 0,3
Via seca < 350 µm	200	1,95 ± 0,02	0,7 ± 0,1
Via seca < 180 µm	230	1,96 ± 0,02	0,8 ± 0,1
Via seca < 105 µm	250	1,95 ± 0,01	1,2 ± 0,1
Via seca < 63 µm	300	1,95 ± 0,01	1,5 ± 0,1



**Figura 5.** Efeitos do tamanho máximo de partícula das massas via seca sobre o módulo de ruptura à flexão após secagem.

Via úmida na medida em que são utilizadas massas constituídas por partículas mais finas.

A Figura 7 evidencia de maneira mais clara, os efeitos do diâmetro máximo de partículas das massas moídas por via seca sobre o processo de vitrificação durante a queima. Representa-se a variação da temperatura de máxima densificação ( $T_d$ ) das massas preparadas por via seca em função do diâmetro máximo de partículas. Mais uma vez, torna-se evidente a influência do tamanho máximo de partículas

das massas processadas por via seca e a necessidade de se trabalhar com granulometrias finas para evitar a utilização de temperaturas de queima demasiadamente elevadas, que poderiam inviabilizar a fabricação de porcelanatos por via seca em processos industriais economicamente vantajosos.

Do ponto de vista estético, também foram observados os efeitos da variação do diâmetro máximo de partículas nas massas preparadas por via seca. Como pode ser verificado na Figura 8, as composições

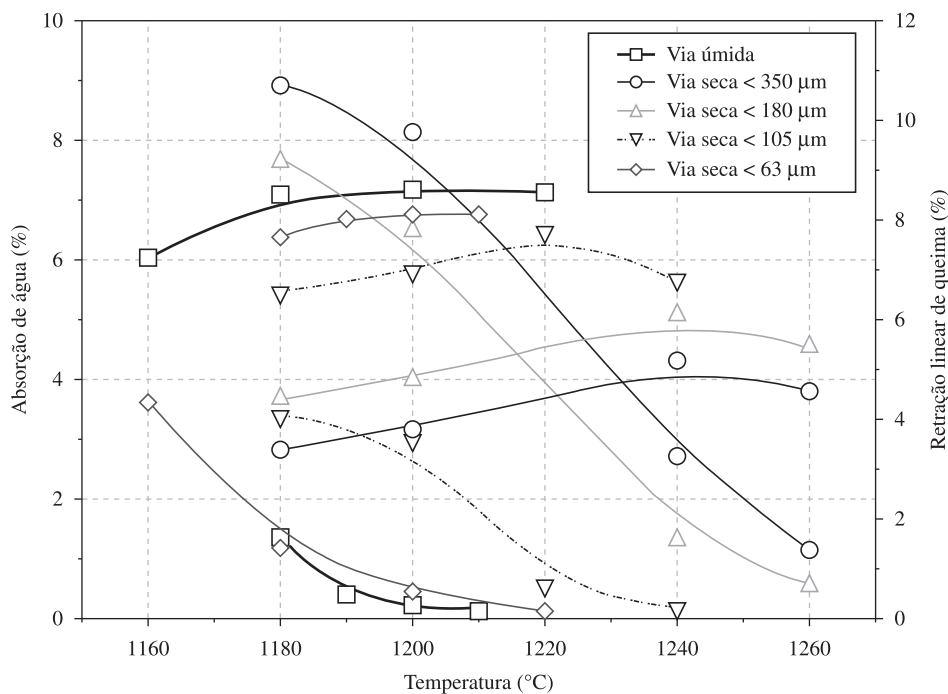


Figura 6. Curvas de gresificação das massas via seca com distintas granulometrias em comparação com a massa via úmida.

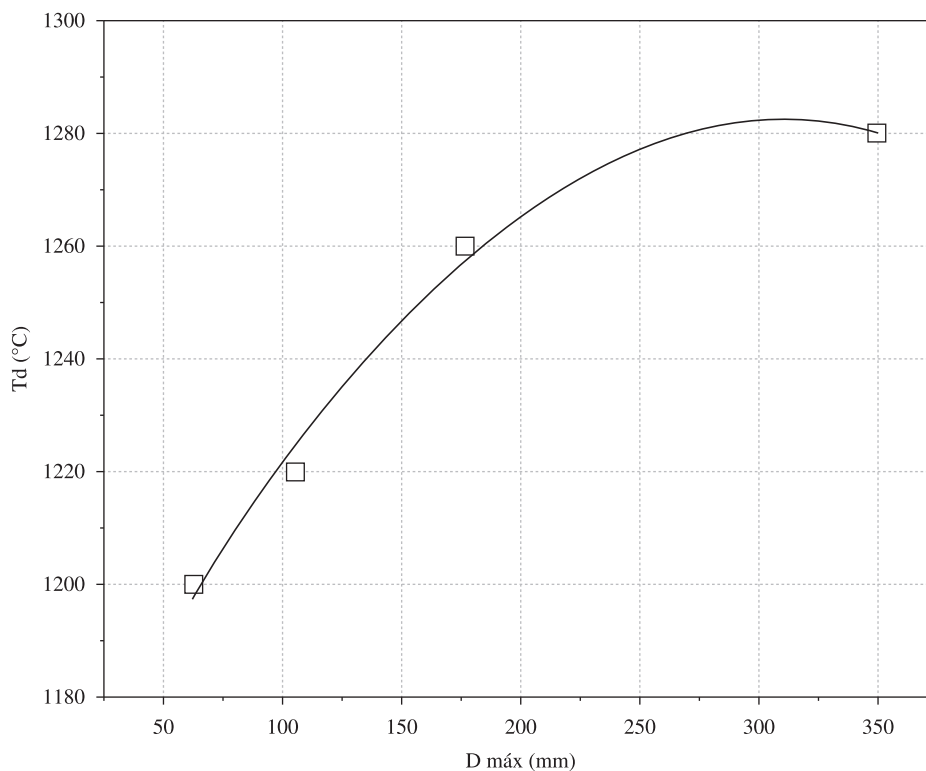


Figura 7. Efeitos do tamanho máximo de partícula das massas via seca sobre a temperatura de máxima densificação.

granulométricas mais grosseiras deram origem a corpos de prova mais heterogêneos, com visíveis efeitos sobre as propriedades estéticas. Estes mesmos efeitos são atenuados e deixam de ser visualizados nas massas Via seca < 105 µm e Via seca < 63 µm, em decorrência da redução do diâmetro máximo de partículas, que provavelmente segue acompanhada pelo aumento da intimidade de mistura.

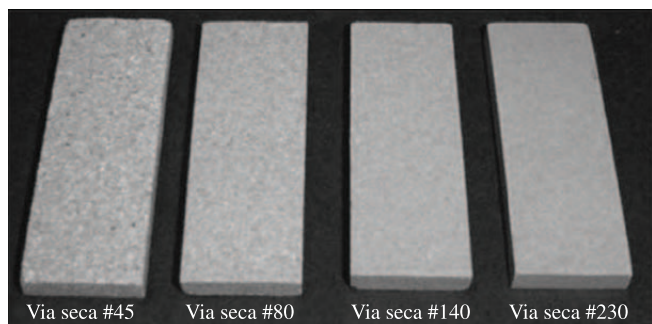
Para finalizar esta etapa do trabalho, são apresentados na Tabela 4 os resultados das determinações do módulo de ruptura à flexão (MRFq), do coeficiente de expansão térmica ( $\alpha_{25-325}$ ) e do índice de piroplasticidade (I.P.) das massas envolvidas no estudo, após queima nas temperaturas de máxima densificação.

Os resultados de MRFq indicam que a microestrutura verde exerce influência nas características da microestrutura final, tendo em vista que mesmo com todas as massas apresentando porosidades abertas praticamente nulas, existem diferenças em suas propriedades mecânicas. As massas preparadas por via seca que possuem elevada participação de partículas grossas apresentaram menores resistências mecânicas após a queima, provavelmente em virtude da presença de defeitos críticos de maiores dimensões na microestrutura, conforme já fora detectado nos corpos verdes.

Com relação aos coeficientes de expansão térmica, as massas Via seca < 350 µm, Via seca < 180 µm e Via seca < 105 µm apresentaram valores muito baixos, que dificultariam o desenvolvimento dos esmaltes (para a fabricação de porcelanatos esmaltados). Este fenômeno provavelmente está relacionado com a presença de grãos grosseiros de quartzo na microestrutura dos corpos obtidos a partir destas massas, os quais podem se desprender da matriz vítrea no resfriamento, em função de suas variações dimensionais<sup>11</sup>. Por este motivo, sua contribuição para o coeficiente de expansão térmica da massa seria reduzida.

Por fim, os resultados ainda evidenciam que as massas constituídas por partículas mais grosseiras apresentam índices de piroplasticidade consideravelmente mais elevados. Este fato decorre da utilização de temperaturas de queima mais altas, as quais promovem reduções na viscosidade da fase vítrea formada, que é principal fenômeno responsável pelo incremento das deformações piropásticas<sup>12,13</sup>.

Dos resultados acima expostos, mais uma vez torna-se evidente a necessidade de utilização de tamanhos máximos de partículas reduzidos para obter resultados aceitáveis para a fabricação de



**Figura 8.** Imagem dos corpos de prova das massas após queima nas respectivas temperaturas de máxima densificação.

**Tabela 4.** Características das massas após queima em suas respectivas temperaturas de máxima densificação.

Composições	MRFq (MPa)	$\alpha_{25-325}$ (°C <sup>-1</sup> )	I.P. (cm <sup>-1</sup> )
Via úmida	43,0 ± 0,7	66,2 × 10 <sup>-7</sup>	7,6 × 10 <sup>-5</sup>
Via seca < 350 µm	26,4 ± 0,7	58,3 × 10 <sup>-7</sup>	18,5 × 10 <sup>-5</sup>
Via seca < 180 µm	28,1 ± 1,0	56,8 × 10 <sup>-7</sup>	17,5 × 10 <sup>-5</sup>
Via seca < 105 µm	38,9 ± 1,9	59,7 × 10 <sup>-7</sup>	14,4 × 10 <sup>-5</sup>
Via seca < 63 µm	43,6 ± 1,1	65,6 × 10 <sup>-7</sup>	9,4 × 10 <sup>-5</sup>

porcelanatos de boas características técnicas e estéticas pelo processo via seca.

## 5. Conclusões Parciais

Os resultados obtidos nesta etapa do trabalho permitem o estabelecimento das seguintes conclusões, relacionadas com a viabilidade da fabricação de porcelanatos de massa clara através do processo via seca:

- A utilização de massas moídas a seco com distribuições de tamanhos de partículas similares àquelas obtidas industrialmente para a fabricação de revestimentos da classe BIIB favorece o empacotamento das partículas durante a conformação, gerando compactos verdes de elevadas densidades aparentes sob baixas pressões de compactação. Em contrapartida, a utilização desta condição de moagem para a fabricação de porcelanatos de massa clara gera corpos mais fracos antes da queima em relação aos compactos produzidos a partir da mesma massa moída a úmido com partículas mais finas;
- Durante a queima, a utilização de massas de porcelanato moídas a seco com distribuições de tamanhos de partículas grosseiras atrasa o processo de vitrificação e impede a obtenção de baixas porosidades em temperaturas de queima praticáveis industrialmente para a fabricação desta tipologia de produtos;
- A intimidade de mistura, por sua vez, apresentou influência menos significativa no comportamento da massa durante a conformação e a sinterização. Seus efeitos mais pronunciados se manifestaram sobre a homogeneidade dos corpos queimados;
- A redução progressiva do diâmetro máximo de partículas por moagem a seco da massa de porcelanato estudada trouxe expressivas melhoras nas propriedades dos compactos verdes e dos corpos queimados, cabendo destacar os aumentos dos módulos de ruptura à flexão antes e após a queima, a redução da temperatura de máxima densificação e do índice de piroplasticidade e o aumento do coeficiente de expansão térmica do produto;
- Através dos resultados obtidos, pode-se dizer que para viabilizar a utilização de massas com a mesma composição química de uma massa de porcelanato tipicamente utilizada nos processos via úmida, seria necessário reduzir o tamanho máximo de partículas para 63 µm (peneira ABNT #230) na moagem via seca. Existem moinhos pendulares, equipados com separadores dinâmicos, que podem gerar granulometrias desta magnitude em processos industriais de moagem por via seca, sem grandes prejuízos de produtividade; e
- Os estudos realizados com relação à composição da massa e ao método de granulação serão abordados nas partes II e III deste trabalho.

## Referências

1. BOSCHI, A. O. The brazilian ceramic tile industry. Reasons of success. *Ceramic Forum International*, v. 85, n. 9, p. E92-E94, 2008.
2. ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS – ANFACER. Disponível em: <http://www.anfacer.org.br>. Acesso em: 10 set. 2012.
3. ALVES, H. J. et al. Análise do consumo de energia térmica no setor brasileiro de revestimentos cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, v. 15, n. 4, p. 1-7, 2010.
4. MONFORT, E. et al. Consumo de energía térmica y emisiones de CO<sub>2</sub> en la fabricación de baldosas cerámicas – análisis de las industrias española y brasileña. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 2012. Artigo aceito para publicação.
5. BARBA, A. et al. *Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas*. Castellón: Instituto de Tecnología Cerámica – AICE, 1997. 291 p.



6. OLIVEIRA, I. R. et al. **Dispersão e empacotamento de partículas**. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000. 224 p.
7. VAN VLACK, L. H. **Propriedades dos materiais cerâmicos**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1973. 318 p.
8. BENLLOCH, A.; AMORÓS, J. L.; NAVARRO, J. E. Estudio de pastas de gres para pavimentos. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, v. 20, n. 1, p. 17-24, 1981.
9. NORRIS, A. W.; TAYLOR, D.; THORPE, I. Range curves: an experimental method for the study of vitreous pottery bodies. **Transactions and Journal of the British Ceramic Society**, v. 78, n. 5, p. 102-108, 1979.
10. REED, J. S. **Principles of ceramics processing**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995. 658 p.
11. AMORÓS, J. L. et al. Influencia del tamaño de partícula del cuarzo sobre la expansión térmica de soportes porosos de pasta blanca. In: CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÁMICO – QUALICER, 6., 2000, Castellón, España. **Anales...** Castellón, 2000. p. 35-37.
12. ZANELLI, C.; DONDI, M.; RAIMONDO, M. Phase transformations during liquid phase sintering of porcelain stoneware tiles: a petrological approach. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SCIENCE, TECHNOLOGY AND APPLICATIONS OF SINTERING, 2003, State College. **Proceedings...** Penn State University, 2003. 6 p.
13. BERNARDIN, A. M.; MEDEIROS, D. S.; RIELLA, H. G. Pyroplasticity in porcelain tiles. **Materials Science and Engineering**, v. A 427, p. 316-319, 2006.