

## Viabilidade da Fabricação de Porcelanatos por Via Seca a Partir de Massas de Cor de Queima Clara. Parte II: Condições de Granulação da Massa

**Fábio Gomes Melchiades<sup>a,b</sup>, Lisandra Rafaela dos Santos Conserva<sup>a,b</sup>,  
Suelen Nastri<sup>a</sup>, Eduardo Cabral<sup>c</sup>, Anselmo Ortega 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

<sup>c</sup>Eirich Industrial Ltda, Estrada Velha de Itu, 1500, CEP 06612-250, Jandira, 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 segunda parte do trabalho, encontram-se os resultados referentes à granulação da massa.

**Palavras-chave:** *porcelanatos, via seca, meio ambiente e granulação.*

### 1. Introdução

Na primeira parte deste estudo<sup>1</sup>, foram apresentados os resultados relacionados com a homogeneização e moagem das matérias-primas envolvidas na fabricação de porcelanatos esmaltados produzidos por via seca a partir de massas de cor de queima clara. As conclusões do trabalho apontam para a necessidade do uso de moinhos pendulares de elevada capacidade de redução de tamanhos de partículas para assegurar as principais propriedades técnicas dos porcelanatos fabricados por via seca.

Nesta etapa do trabalho, encontram-se os resultados dos estudos de granulação da massa através do processo via seca. Tradicionalmente, os porcelanatos fabricados por via úmida são produzidos a partir de massas granuladas por atomização<sup>2</sup>, que apresentam excelente fluidez para o preenchimento dos estampos das prensas. As massas de revestimentos cerâmicos preparadas por via seca no Brasil, em contrapartida, são granuladas em umectadores verticais que produzem baixa aglomeração das partículas, de modo que seus grânulos são muito finos e de formatos irregulares<sup>3</sup>. Consequentemente, os grânulos das massas de revestimentos cerâmicos preparadas por via seca atualmente possuem baixa fluidez.

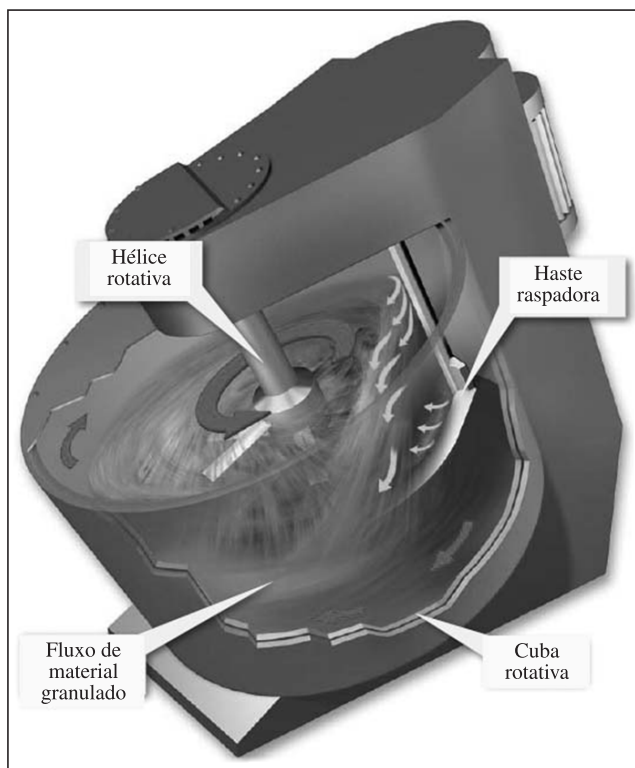
A baixa fluidez<sup>4</sup> dificulta o preenchimento uniforme dos estampos das prensas e tende a gerar compactos verdes com gradientes de porosidade. Estas deficiências podem ser toleradas mais facilmente nos revestimentos cerâmicos atualmente fabricados por via seca, mas podem ser barreiras expressivas para a fabricação de porcelanatos por este processo. Isto se deve ao fato de que os porcelanatos apresentam graus de vitrificações muito elevados durante a queima e atualmente são fabricados em formatos de grandes dimensões. Os gradientes de densidade aparente nos compactos verdes oriundos da utilização de

massas de baixa fluidez para o carregamento dos estampos tendem a gerar significativas variações de retrações entre regiões distintas das peças durante a queima, produzindo deformações<sup>5</sup> que podem comprometer as características geométricas dos produtos fabricados.

Considerando, portanto, as elevadas retrações apresentadas pelas massas de porcelanato durante a queima, este trabalho parte do pressuposto de que para a fabricação de porcelanatos de cor de queima clara, de boas características técnicas e estéticas, torna-se necessária a utilização de massas cerâmicas de boa fluidez para o preenchimento dos estampos das prensas.

Neste sentido, neste trabalho foi avaliada a possibilidade de utilização de um misturador e granulador Eirich (processo EcoPrep), que se apresenta como uma interessante alternativa, em massas preparadas por via seca, para a geração de grânulos de boa fluidez. Trata-se de um misturador e granulador rotativo de alta potência, que utiliza um sistema de movimentação do material em contracorrente com a movimentação da cuba do equipamento<sup>3</sup>, conforme se verifica através da ilustração expressa na Figura 1.

Neste equipamento, as matérias-primas são inicialmente homogeneizadas e a seguir realiza-se a adição de água, em teores compreendidos entre 10 e 15% para garantir a formação de grânulos esféricos. Por meio da velocidade de rotação, do tempo de permanência da massa no interior do equipamento e da quantidade de água adicionada, consegue-se controlar as propriedades (tamanhos, formatos, etc.) dos grânulos obtidos. Após períodos curtos de residência no interior do equipamento, são obtidos grânulos de boa esfericidade e tamanhos similares aos grânulos produzidos por atomização. Tendo em vista o elevado teor de água adicionado para a



**Figura 1.** Representação esquemática do misturador e granulador Eirich.

granulação, normalmente se faz necessária a utilização de secadores do tipo leito fluidizado ao final da granulação, visando reduzir a umidade da massa para o teor adequado para a prensagem.

## 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 as possibilidades de obtenção de grânulos preparados por processos via seca com fluidez compatível com as exigências necessárias para a fabricação de porcelanatos de boas propriedades técnicas;
- Discutir a viabilidade técnica da utilização de granuladores Eirich (processo EcoPrep) para a preparação de massas de porcelanato pelo processo via seca; e
- Identificar os efeitos do teor de umidade durante a prensagem das massas granuladas através do processo acima citado.

Os estudos relacionados com a moagem da massa e o desenvolvimento de formulações de massas destinadas a este processo são apresentados nas Partes I e III deste artigo, respectivamente.

## 3. Procedimento Experimental

### 3.1. Características dos grânulos

Esta etapa do trabalho foi realizada com a utilização de uma massa industrial empregada para a fabricação de porcelanatos esmaltados. Foram coletadas amostras desta massa na forma de grânulos atomizados produzidos em escala industrial (Via úmida – Atomizada) e das respectivas matérias-primas previamente dosadas na proporção em que são utilizadas na composição da massa.

A amostra da massa atomizada coletada foi previamente caracterizada quanto à composição química por fluorescência de raios X, cujos resultados já foram apresentados na Parte I deste estudo<sup>1</sup>.

As matérias-primas dosadas na mesma proporção da massa atomizada foram moídas por via seca em moinho de martelos de laboratório, com complementação da moagem realizada a seco em almofariz e moinho de bolas de moagem rápida de laboratório. A moagem foi realizada controlando-se o teor de resíduo por peneiramento a úmido, até obtenção de resíduo e distribuição de tamanhos de partículas similares em comparação com a massa atomizada industrial.

Nesta etapa do trabalho, teve-se por objetivo a obtenção de distribuições de tamanhos de partículas similares entre a massa moída industrialmente a úmido e a massa moída a seco em laboratório, para avaliação isoladamente dos efeitos das condições de granulação da massa.

A massa moída a seco foi granulada em um granulador de laboratório Eirich Intensive Mixer Type R, com adição de 13% de água, controlando-se a velocidade de rotação e o tempo de permanência do material no interior do equipamento, buscando a obtenção de distribuições granulométricas similares à massa atomizada industrial. A massa moída e granulada por via seca foi denominada Via seca – EcoPrep.

A seguir, o teor de umidade da massa Via seca – EcoPrep foi reduzido para 6,5% (mesmo teor de umidade da massa atomizada) por secagem em estufa e ao ar livre. Estas duas massas (Via úmida – Atomizada e Via seca – EcoPrep) de mesma composição química e diferenças fundamentais no método de granulação foram caracterizadas comparativamente através das seguintes análises:

- Distribuição granulométrica em peneiras: para a realização das análises foi utilizada uma bateria de peneiras com aberturas de 500, 250, 125 e 63  $\mu\text{m}$ . O peneiramento foi realizado com auxílio de vibrador de peneiras de laboratório, durante 10 minutos. O procedimento foi repetido duas vezes para cada amostra e os resultados apresentados correspondem aos valores médios. Para a análise dos resultados, os dados são apresentados na forma de curvas granulométricas cumulativas foram destacados alguns parâmetros granulométricos numéricos, tais como o diâmetro médio dos grânulos ( $D_{50}$ ), a fração mássica de grânulos com diâmetros superiores a 500  $\mu\text{m}$  ( $\% >500 \mu\text{m}$ ) e a fração de grânulos com diâmetros inferiores a 125  $\mu\text{m}$  ( $\% <125 \mu\text{m}$ );
- Índice de Hausner, densidade de preenchimento e empacotamento: as amostras granuladas foram caracterizadas quanto à densidade aparente após preenchimento livre e após empacotamento em proveta. Os resultados destas análises foram utilizados para a avaliação indireta da fluidez, através do Índice de Hausner<sup>4</sup>, que é representado pela razão entre a densidade de empacotamento e a densidade de preenchimento. Índices de Hausner mais próximos da unidade (1,000) correspondem a massas de maiores fluidez; e
- Análise morfológica dos grânulos: as análises foram realizadas por observação dos grânulos nos microscópios ótico digital (MOD) e eletrônico de varredura (MEV). Nas análises de microscopia eletrônica, os grânulos foram previamente embutidos em resina acrílica. Mediante o polimento das amostras embutidas, foi possível obter imagens da seção transversal dos grânulos para observação de suas estruturas internas.

### 3.2. Desempenhos dos grânulos durante a fabricação

O desempenho durante a fabricação da massa atomizada de porcelanato esmaltado em comparação com a massa de mesma composição química preparada por via seca através dos procedimentos descritos na seção anterior foi avaliado. Para a realização desta etapa do trabalho, após a granulação por via seca, a massa foi seca até 10,0% e 6,5%, de modo que as massas via seca foram prensadas nestas duas condições.

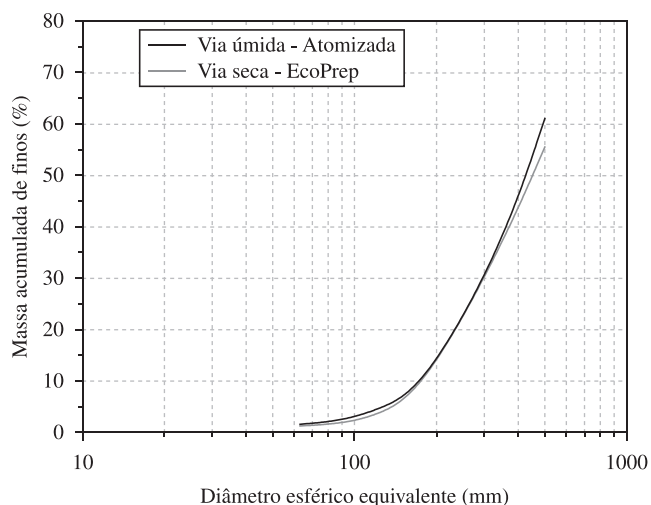
Sendo assim, as seguintes composições foram caracterizadas comparativamente: atomizada com 6,5% de umidade (Via úmida – 6,5), granulada via seca com 6,5% de umidade (Via seca – 6,5) e granulada via seca com 10,0% de umidade (Via seca – 10,0). Corpos de prova prismáticos de  $60 \times 20 \times 6 \text{ mm}^3$  foram prensados com estas massas, utilizando pressão de compactação de  $370 \text{ kgf/cm}^2$ . Os corpos obtidos foram caracterizados mediante as seguintes análises:

- Densidade aparente: determinada após secagem a  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  em estufa elétrica. A massa foi determinada em balança com precisão de  $0,01 \text{ g}$  e o volume determinado geometricamente com paquímetro de  $0,01 \text{ mm}$  de precisão;
- Retração linear de secagem: avaliada nos mesmos corpos de prova anteriormente descritos, com medições de comprimento realizadas com paquímetro antes e após a secagem em estufa a  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- Módulo de ruptura à flexão após secagem e após queima: determinada em flexímetro Nannetti C-96-2006 para corpos de prova de laboratório. Nos corpos queimados, as análises foram realizadas após queima nas temperaturas necessárias para que cada massa atingisse absorção de água inferior a  $0,5\%$ ;
- Curvas de gresificação: determinadas mediante a queima de cada massa em quatro temperaturas distintas, mantendo-se ciclo de queima de 45 minutos de duração em cada caso, com 5 minutos de patamar nas máximas temperaturas. A absorção de água e a retração linear de queima dos corpos de prova foram avaliadas em cada temperatura de queima; e
- Análise microestrutural: seções transversais polidas dos corpos de prova queimados nas temperaturas necessárias para a obtenção de absorções de água inferiores a  $0,5\%$  foram avaliadas sob distintas ampliações no microscópio eletrônico de varredura (MEV).

## 4. Análise e Discussão dos Resultados

### 4.1. Características dos grânulos

As distribuições granulométricas cumulativas das massas Via úmida – Atomizada e Via seca – EcoPrep são apresentadas na Figura 2. Para facilitar a interpretação dos resultados, a Tabela 1



**Figura 2.** Distribuições de tamanhos de grânulos das massas Via úmida – Atomizada e Via seca – EcoPrep.

**Tabela 1.** Parâmetros granulométricos destacados das massas Via úmida - Atomizada e Via seca – EcoPrep.

Massas	$D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	Fração $> 500 \mu\text{m}$ (%)	Fração $< 125 \mu\text{m}$ (%)
Via úmida – Atomizada	420	39,0	4,6
Via seca – EcoPrep	460	44,5	3,5

indica alguns parâmetros granulométricos determinados a partir das distribuições de tamanhos dos grânulos. Os resultados destas análises indicam que é possível obter, através do processo EcoPrep, grânulos com as mesmas distribuições de tamanhos dos grânulos atomizados. Este resultado é particularmente interessante se considerarmos as distribuições granulométricas das massas preparadas por via seca nos umectadores tipicamente utilizados no Brasil para a granulação de massas de revestimentos cerâmicos<sup>3</sup>. Em geral, as massas industriais preparadas por via seca apresentam elevada fração de grânulos finos, dado o baixo grau de aglomeração das partículas obtido durante a granulação. Em vista do maior número de pontos de contato entre os grânulos por unidade de volume, estas massas apresentam fluidez muito baixa<sup>6</sup>. Sendo assim, os resultados dos testes realizados com o granulador testado indicam que este sistema de preparação de massas por via seca permite a obtenção de grânulos semelhantes aos atomizados, no que diz respeito à distribuição de tamanhos.

Além da distribuição de tamanhos semelhante, as imagens apresentadas nas Figuras 3 a 5 evidenciam que os grânulos da massa Via seca - EcoPrep apresentam-se com formatos bastante regulares, aproximando-se bastante dos formatos esféricos dos grânulos atomizados. Com auxílio da Figura 5, nota-se que a principal diferença entre os grânulos constituintes das duas massas está em suas estruturas internas. Muitos dos grânulos atomizados apresentam-se ocios, contendo poros de grandes dimensões em seu interior, relacionados com o próprio processo de atomização da massa, onde ocorre a evaporação da água da suspensão introduzida no atomizador. Esta particularidade dos grânulos atomizados é discutida em detalhes na literatura<sup>7,8</sup> e apresenta importante relação com o comportamento mecânico destes grânulos durante a prensagem. Os grânulos da massa Via seca – EcoPrep, por sua vez, apresentam-se maciços, em função da natureza do processo de granulação.

Em virtude da estrutura maciça e do melhor empacotamento das partículas encontrado nos grânulos preparados por via seca através do processo EcoPrep, as densidades de preenchimento e empacotamento são mais elevadas em comparação com a massa atomizada, conforme se verifica na Tabela 2. Entretanto, o principal resultado indicado na Tabela 2 diz respeito à fluidez das massas, avaliada através dos Índices de Hausner. Tendo em vista que as duas massas possuem grânulos com distribuições de tamanhos e morfologias similares, ambas apresentam fluidez elevadas e semelhantes entre si. Este resultado indica a possibilidade de obtenção de massas granuladas por via seca com fluidez da mesma magnitude das massas atomizadas, o que pode ser muito importante para a viabilização da fabricação de porcelanatos por via seca.

### 4.2. Desempenhos dos grânulos durante a fabricação

As Figuras 6 a 8 representam os resultados comparativos da caracterização das massas antes da queima, quanto à densidade aparente, retração linear de secagem e módulo de ruptura à flexão após secagem.

Conforme evidenciado pela Figura 6, as massas preparadas por via seca por meio do processo EcoPrep, independentemente do conteúdo de umidade utilizado para a prensagem, geraram corpos de densidades aparentes muito superiores em relação à massa de mesma composição química, preparada por atomização. Tais diferenças podem ser explicadas pelas naturezas distintas dos grânulos. Os grânulos preparados através do processo EcoPrep são muito mais densos do que os grânulos atomizados e geram corpos de porosidades



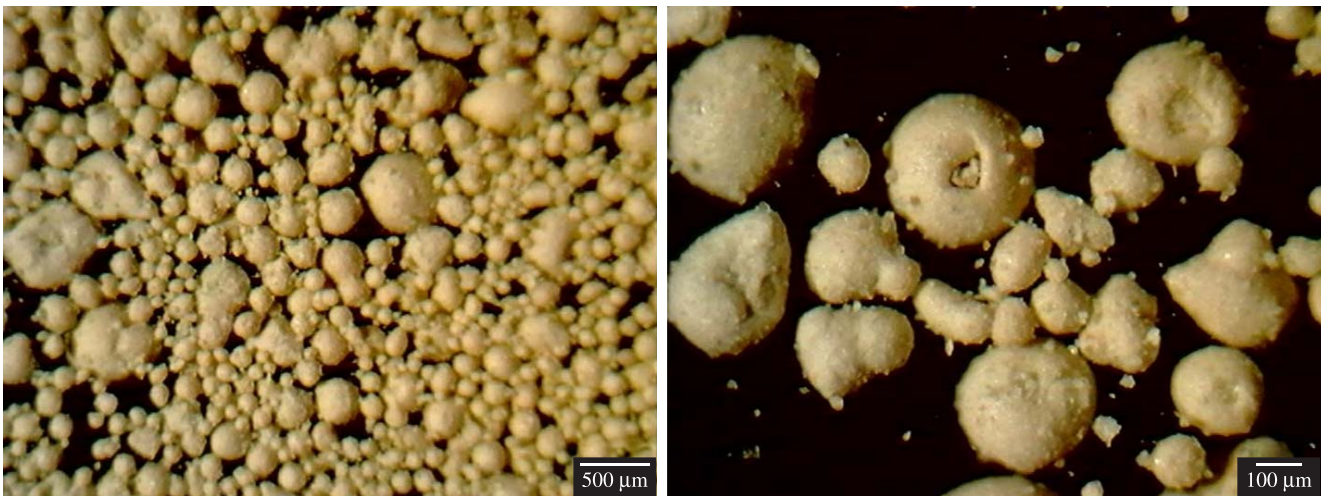


Figura 3. Imagens de microscopia ótica dos grânulos constituintes da massa Via úmida – Atomizada.

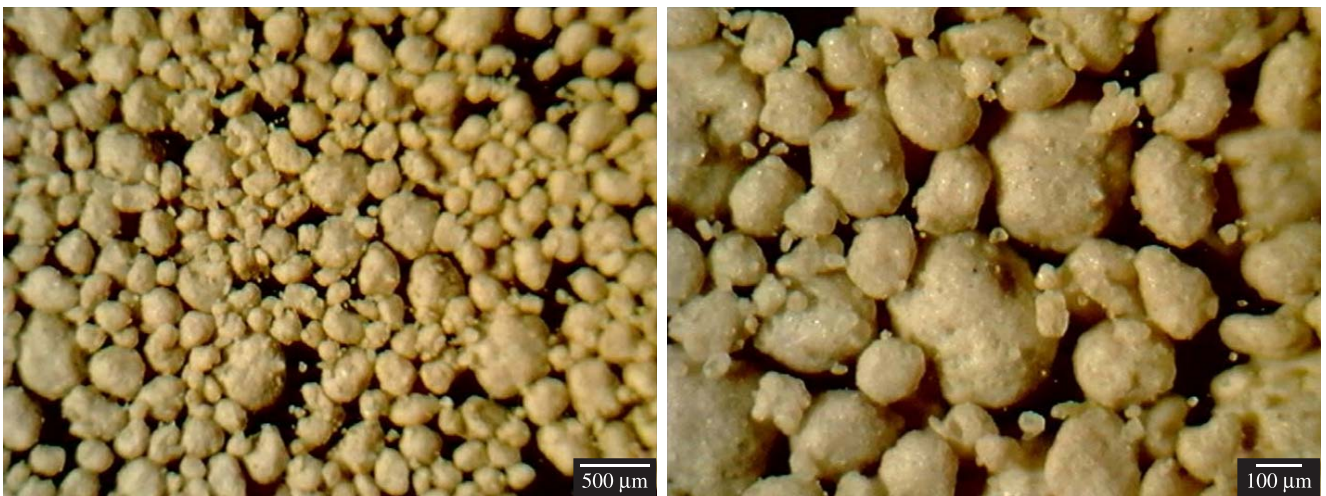


Figura 4. Imagens de microscopia ótica dos grânulos constituintes da massa Via seca – EcoPrep.

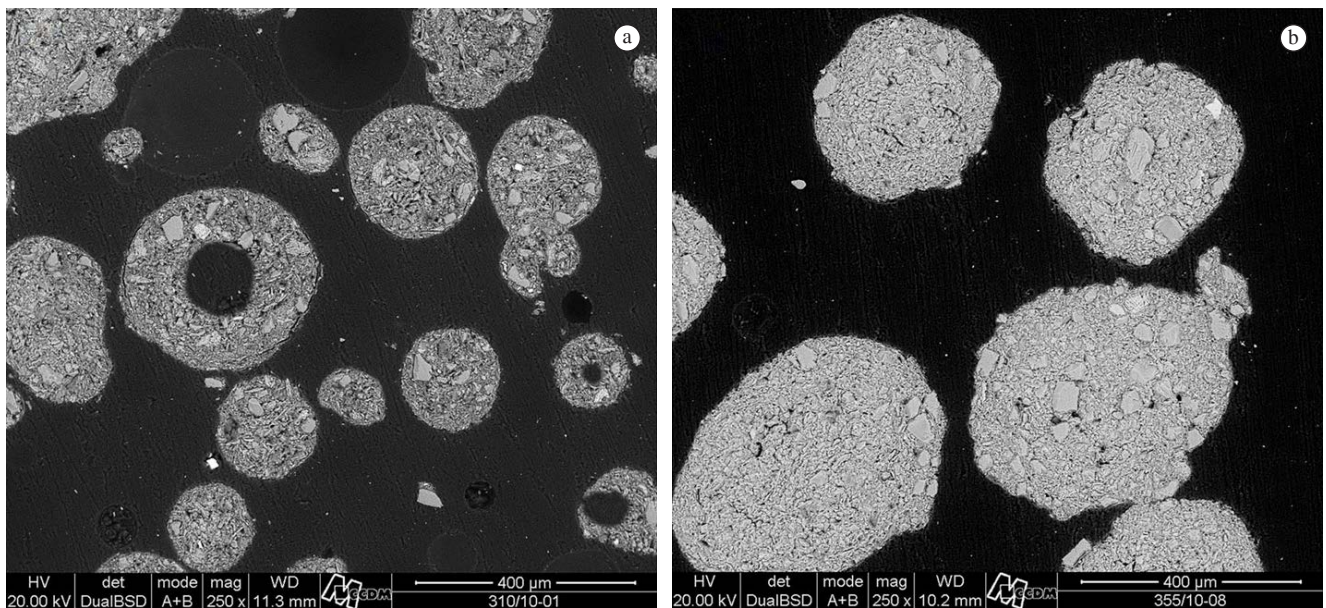
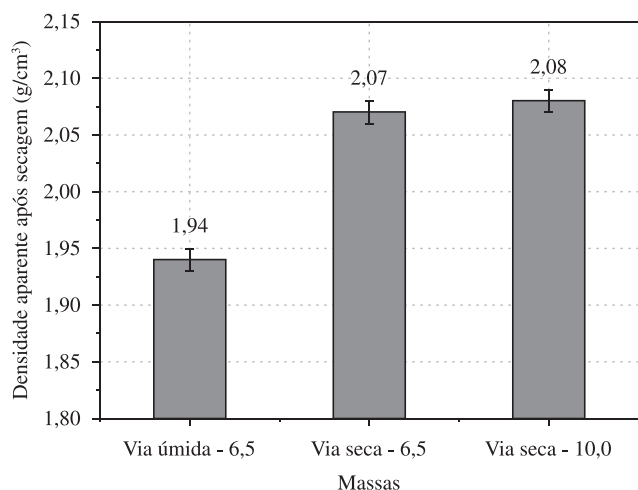
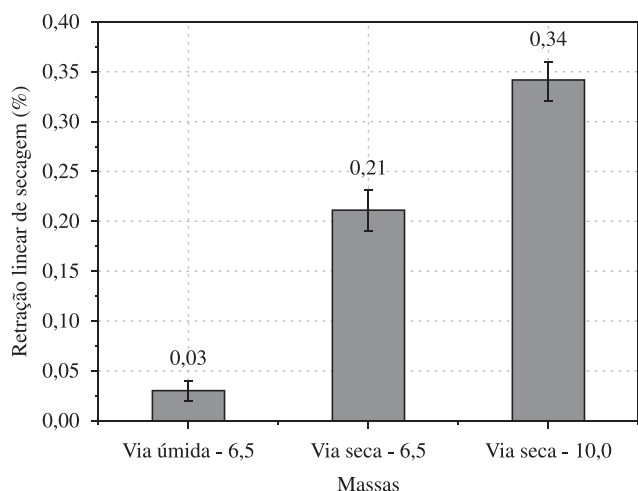
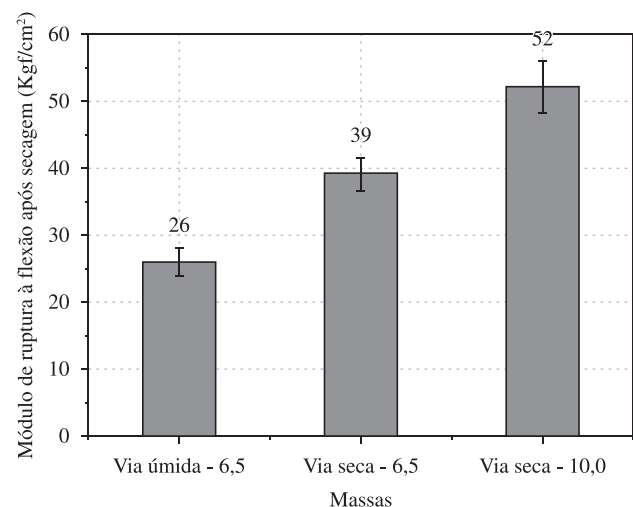


Figura 5. Imagens de microscopia eletrônica das seções transversais dos grânulos constituintes das massas a) Via úmida – Atomizada e b) Via seca – EcoPrep.

**Tabela 2.** Densidade de preenchimento ( $\rho_p$ ), densidade de empacotamento ( $\rho_E$ ) e Índice de Hausner (I.H.) das massas Via úmida – Atomizada e Via seca – EcoPrep.

Massas	I.H.	$\rho_p$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_E$ (g/cm <sup>3</sup> )
Via úmida – Atomizada	1,140	1,02	1,16
Via seca – EcoPrep	1,152	1,17	1,35

**Figura 6.** Densidades aparentes após secagem dos corpos de prova das massas.**Figura 7.** Retração linear de secagem dos corpos de prova das massas.**Figura 8.** Módulos de ruptura à flexão após secagem dos corpos de prova das massas.

intragranulares reduzidas após a compactação sob mesma pressão de prensagem. Consequentemente, os corpos verdes obtidos a partir dos grânulos EcoPrep são menos porosos após a compactação.

Entretanto, em função do maior empacotamento de partículas, estes grânulos também são menos deformáveis durante a prensagem, gerando corpos de porosidades intergranulares expressivas<sup>3</sup>. Estes poros remanescentes entre os grânulos após a prensagem contribuem para aumentar de maneira notável a retração de secagem da massa. Como se verifica pela Figura 7, a massa Via seca – 6,5 apresenta retração de secagem muito superior em relação à massa Via úmida – 6,5, ainda que as composições químicas destas massas sejam iguais e os teores de umidade das massas utilizadas para a prensagem também sejam os mesmos. Quando se incrementa o conteúdo de umidade para prensagem da massa preparada por via seca (Via seca – 10,0), como esperado, nota-se um incremento da retração de secagem dos corpos de prova. Estes resultados apontam para a necessidade de ciclos de secagem mais cautelosos para a fabricação de porcelanatos por via seca utilizando grânulos preparados pelo processo EcoPrep. Ainda que a retração de secagem seja muito superior em relação à retração de secagem da mesma massa preparada por atomização, deve-se ressaltar que as retrações de secagem das massas Via seca – 6,5 e Via seca – 10,0 podem ser consideradas aceitáveis, considerando as retrações de secagem usualmente encontradas em massas de revestimentos cerâmicos.

Na Figura 8, verifica-se que o melhor empacotamento das partículas gerado nos grânulos preparados por via seca favorece a resistência mecânica dos corpos de prova antes da queima. Em função da maior densidade aparente, observou-se aumento de 50% na resistência mecânica da massa Via seca – 6,5 em comparação com a massa Via Úmida – 6,5. Ainda que a densidade aparente após secagem dos corpos da massa Via Seca – 10,0 seja equivalente à dos corpos da massa Via seca – 6,5, nota-se um aumento considerável de resistência mecânica quando se utiliza umidade mais elevada para a prensagem. Este resultado se deve à redução da pressão de fluência<sup>3</sup> dos grânulos causada pelo aumento da umidade da massa, que facilita a diminuição dos tamanhos dos poros intergranulares nos corpos compactados. Os resultados da avaliação do desempenho mecânico dos corpos verdes apontam para grandes vantagens do processo via seca em relação à massa atomizada. Incrementos expressivos de resistência mecânica nos corpos verdes podem ser obtidos através do processo EcoPrep, o que pode inclusive facilitar a fabricação de produtos de espessura reduzida sem a necessidade de incorporação de aditivos ligantes, os quais encontram larga utilização nas massas de porcelanato destinadas à fabricação de revestimentos cerâmicos de baixa espessura, em função da necessidade de incremento da resistência mecânica nos corpos verdes.

Os comportamentos durante a queima das massas estudadas nesta etapa do trabalho podem ser convenientemente analisados através dos diagramas de gresificação indicados na Figura 9. Para melhor ilustrar os resultados, a Figura 10 indica a temperatura de queima necessária para que cada massa atinja absorção de água inferior a 0,5% (especificação da norma NBR 15.463, para porcelanatos esmaltados). Nas temperaturas de queima indicadas para cada massa, determinou-se a retração linear de queima (Figura 11) e o módulo de ruptura à flexão dos corpos de prova (Figura 12).

Verifica-se através da Figura 9 que a massa Via seca – 6,5 não se beneficia da densidade aparente mais elevada dos corpos de prova verdes, necessitando de temperaturas de queima elevadas a



obtenção da absorção de água especificada. Em função da porosidade intergranular remanescente nos corpos verdes desta massa, a velocidade de vitrificação é reduzida em altas temperaturas e são encontradas dificuldades para eliminação dos poros abertos presentes entre os grânulos. Neste sentido, absorção de água inferior a 0,5%

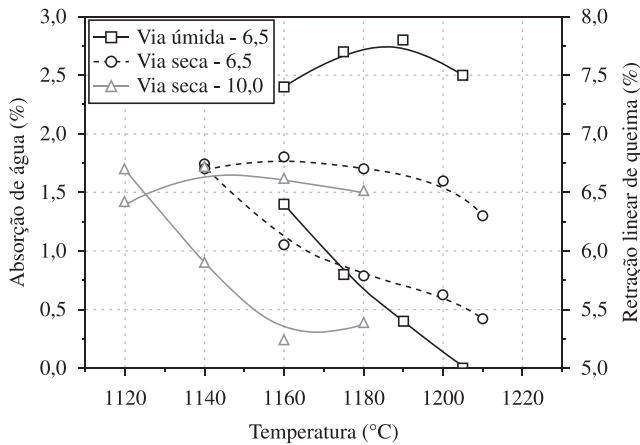


Figura 9. Curvas de gresificação das massas.

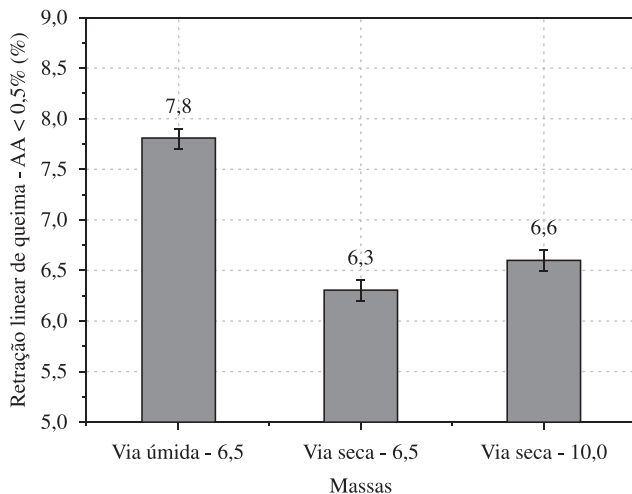


Figura 10. Temperaturas de queima necessárias para a obtenção de absorção de água inferior a 0,5% em cada massa.

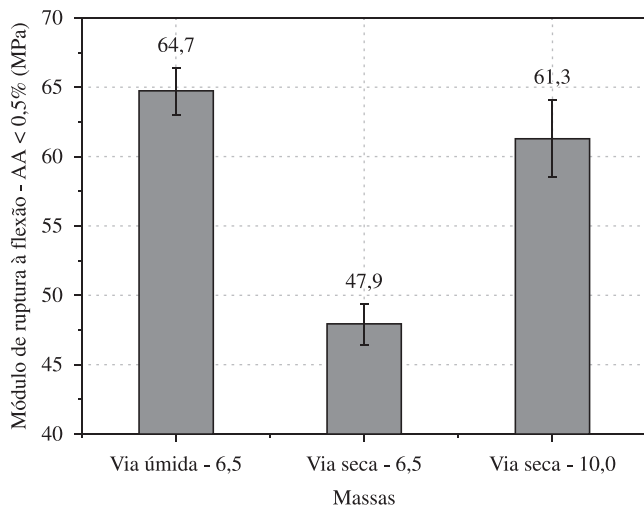


Figura 11. Retrações lineares de queima das massas em suas respectivas temperaturas de queima.

somente é obtida em uma temperatura em que os corpos já iniciam o processo de inchamento (redução da retração de queima com o aumento da temperatura de queima), tendo em vista que os gases presentes no interior dos poros fechados expandem com o aumento da temperatura. A massa Via seca - 10,0, por sua vez, apresenta o comportamento esperado, considerando a elevada densidade aparente dos corpos antes da queima. Sua vitrificação ocorre em velocidade semelhante em relação à massa Via úmida - 6,5%, de modo que a absorção de água atinge a especificação para porcelanatos esmaltados em baixas temperaturas.

Tais resultados podem ser melhor visualizados na Figura 10, que indica a importância da utilização de umidades elevadas nas massas preparadas através do processo EcoPrep. Enquanto a massa via seca prensada com 6,5% umidade necessita de 20 °C a mais de temperatura para atingir a mesma absorção de água que a massa atomizada, a mesma massa via seca, prensada com 10,0% de umidade, requer temperatura de queima 20 °C mais baixa. Tais resultados são consequência dos efeitos da umidade sobre a facilidade de deformação dos grânulos via seca durante a prensagem.

Outros importantes resultados são apresentados nas Figuras 11 e 12. Observa-se que, em função da maior densidade após secagem dos compactos verdes das massas preparadas por via seca, as retrações de queima são expressivamente mais baixas nestas massas em comparação com a massa atomizada. Este resultado é particularmente importante para assegurar uma maior estabilidade dimensional dos porcelanatos fabricados por via seca e ainda permite que uma maior produtividade seja obtida com um mesmo número de peças fabricadas.

Na Figura 12, confirma-se a importância da utilização de teores de umidade mais elevados nas massas granuladas através do processo via seca considerado. A utilização de baixos teores de umidade para prensagem mantém poros intergranulares de grandes dimensões na microestrutura das peças queimas e compromete a resistência mecânica das peças queimadas. À medida que se trabalha com a mesma massa, com conteúdo de umidade mais elevado para a prensagem (Via seca - 10,0), o módulo de ruptura à flexão incrementa-se de modo expressivo e torna-se equiparável ao módulo de ruptura dos corpos produzidos a partir da massa atomizada. Estes resultados são claramente explicados pela deformação dos grânulos durante a prensagem, que condiciona a manutenção de poros intergranulares de difícil eliminação durante a queima na

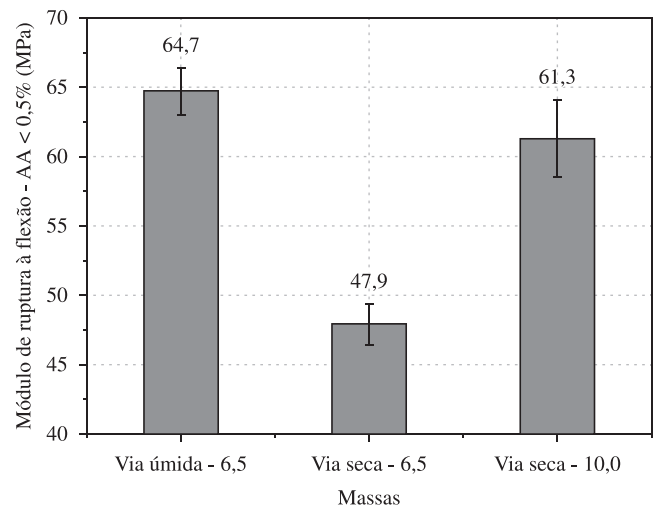
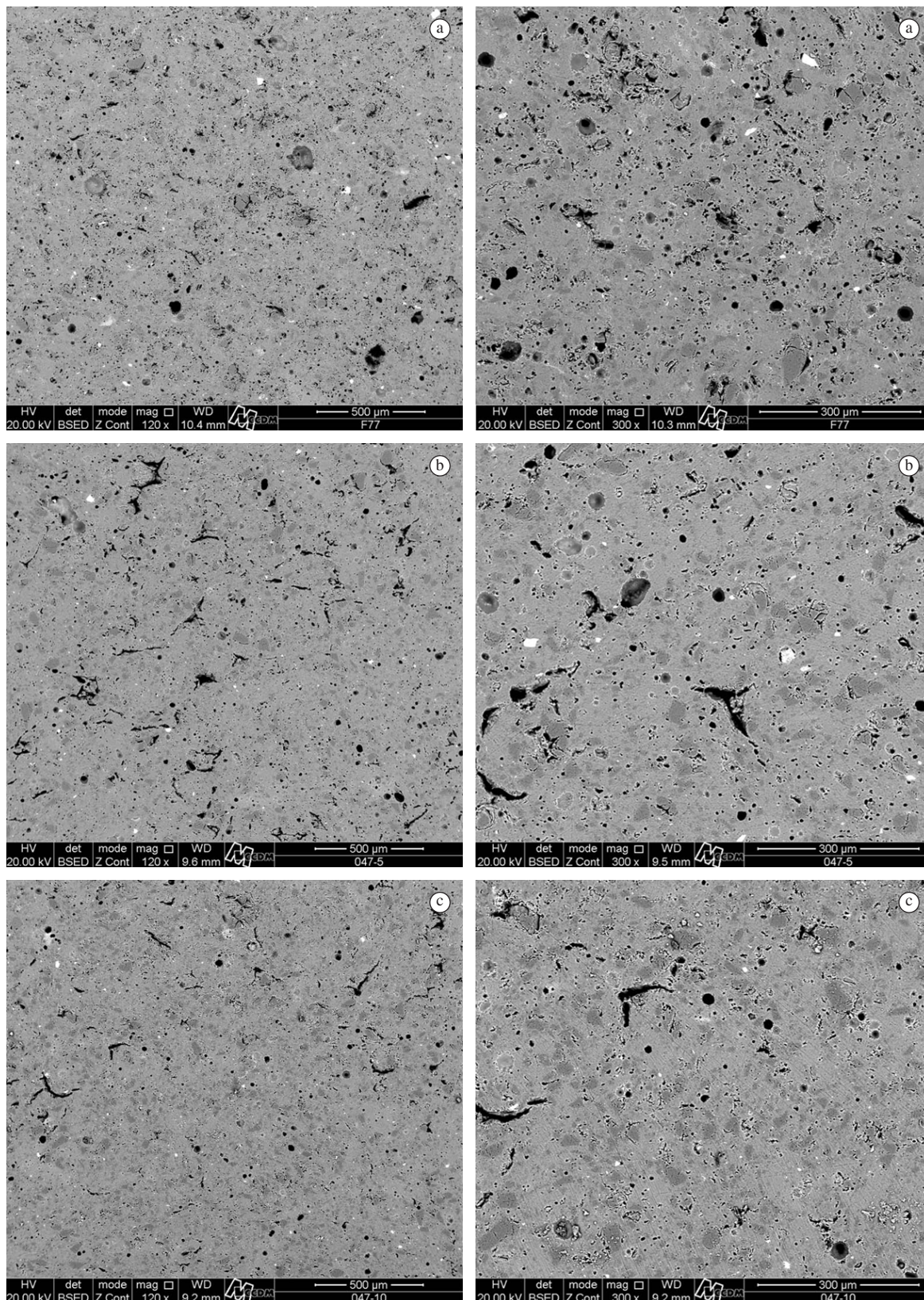


Figura 12. Módulos de ruptura à flexão das massas em suas respectivas temperaturas de queima.

microestrutura das peças. As imagens de microscopia apresentadas na Figura 13 facilitam a visualização dos aspectos acima discutidos.

Para finalizar esta etapa do trabalho, foi realizado um teste semi-industrial em uma empresa produtora de porcelanatos

esmaltados. O teste foi realizado com um porcelanato de dimensões nominais  $60 \times 60 \text{ cm}^2$ , de 10 mm de espessura, produzido com esmalte brilhante. A Figura 14 apresenta a imagem de uma peça produzida por via seca, moída e granulada de acordo com os conceitos discutidos



**Figura 13.** Imagens obtidas no MEV das microestruturas dos corpos de cada massa em suas respectivas temperaturas de queima a) Via úmida – 6,5; b) Via seca – 6,5 e c) Via seca – 10,0.





**Figura 14.** Imagens de porcelanatos  $60 \times 60 \text{ cm}^2$  produzidos por via seca e via úmida em testes semi-industriais.

nas Partes I e II deste trabalho, em comparação com o mesmo produto fabricado por via úmida. À parte de alguns problemas de secagem, relacionados com a maior retração de secagem da massa via seca, excelentes resultados foram obtidos. Os problemas de secagem também foram rapidamente contornados, mediante a realização de ajustes na regulagem do secador.

## 5. Conclusões Parciais

Os resultados obtidos nesta etapa do trabalho permitem o estabelecimento das seguintes conclusões, relacionadas com a etapa de granulação de massas de porcelanato esmaltado de cor de queima clara, produzidos por via seca:

- O processo EcoPrep pode ser considerado uma alternativa viável para a granulação de massas moídas a seco, tendo em vista que os grânulos gerados apresentam distribuições granulométricas, morfologias e fluidez compatíveis com os atomizados. Tais características são bastante superiores às características dos grânulos obtidos nos granuladores verticais utilizados nos produtores nacionais de revestimentos cerâmicos que utilizam o processo via seca. Especialmente quando se considera a preparação de massas para a fabricação por via seca de porcelanatos de grandes formatos, o processo estudado apresenta-se como excelente opção para evitar os problemas decorrentes do carregamento heterogêneo dos estampos das prensas;
- Os grânulos preparados pelo processo EcoPrep são mais densos e menos deformáveis que os grânulos preparados por atomização. Consequentemente, exigem a utilização de teores de umidades mais elevados para a prensagem para impedir a presença de poros intergranulares de grandes dimensões na microestrutura das peças produzidas;

- Comparativamente com massas preparadas por via úmida, as massas preparadas por via seca neste trabalho geraram corpos de densidades aparentes a verde expressivamente mais elevadas. Consequentemente, a resistência mecânica antes da queima apresenta-se mais elevada, a temperatura necessária para a obtenção da absorção de água requerida para os porcelanatos é inferior e a retração de queima sofre importante redução. Em contrapartida, retrações de secagem notavelmente superiores são obtidas em comparação com os corpos preparados a partir de massas atomizadas, o que exige a utilização de ciclos de secagem mais cuidadosos para se evitar trincas e problemas de secagem em geral;
- Testes semi-industriais foram realizados com excelentes resultados a partir de massas preparadas por via seca, nas condições indicadas neste trabalho. Tais resultados comprovam a viabilidade do método de granulação estudado para a fabricação de porcelanatos de massa clara, fabricados por via seca; e
- Os estudos de formulação de massas direcionados para a fabricação de porcelanatos de massa clara pelo processo via seca serão apresentados na parte III deste trabalho.

## Referências

1. MELCHIADES, F. G. et al. Viabilidade da fabricação de porcelanatos por via seca a partir de massas de cor de queima clara. Parte I: Condições de moagem e homogeneização da massa. *Cerâmica Industrial*, v. 17, n. 4, p. 13-21, 2012.
2. NEGRE, F. et al. Estudo da operação de secagem por atomização de pós cerâmicos em escala industrial: seu controle e automatização. *Cerâmica Industrial*, v. 5, n. 2, p. 47-52, 2000.
3. MELCHIADES, F. G. **Estudo comparativo entre as tecnologias via úmida e via seca para a preparação de massas de porcelanatos**. 2011. Tese (Doutorado)-Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.
4. QUINTEIRO, E. **Efeito das características de pós atomizados sobre as características e qualidade de revestimentos cerâmicos**. 1996. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1996.
5. AMORÓS, J. L. et al. **Defectos de fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos**. Castellón: AICE, 1991. 169 p.
6. GHORRA, G. Wet vs. dry processing: granulation of ceramic powders. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, v. 10, n. 1-2, p. 18-35 1989.
7. AMORÓS, J. L. et al. Fracture properties of spray-dried powder compacts: Effect of granule size. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 28, p. 2823-2834, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.05.004>
8. ECKHARD, S.; NEBELUNG, M. Investigations of the correlation between granule structure and deformation behavior. *Powder Technology*, v. 206, p. 79-87, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2010.06.002>