

BALDOSAS DE GRES PORCELÁNICO ELABORADAS POR VÍA SECA

^(1,2) F. G. Melchiades, ⁽¹⁾ M. T. Daros, ^(1,2) A. O. Boschi

⁽¹⁾ Laboratório de Revestimentos Cerâmicos - LaRC
Departamento de Engenharia de Materiais - DEMa
Universidade Federal de São Carlos – UFSCar - Brasil
daob@ufscar.br

⁽²⁾ Programa de Post Grado en Ciencia e Ingeniería de Materiales – PPGCEM
UFSCar - Brasil

RESUMEN

La vía seca ha sido utilizada para la elaboración de baldosas cerámicas desde hace bastante tiempo. En Brasil, segundo productor mundial de baldosas, actualmente el 70% de las baldosas se elaboran por vía seca. Una de las principales razones que han llevado a este desarrollo es el hecho de que la vía seca utiliza aproximadamente un 30% menos de energía térmica que la tradicional vía húmeda. En los últimos años, se ha observado una importante mejora en la calidad de las baldosas fabricadas por vía seca, y en la actualidad resulta bastante difícil distinguir entre los productos elaborados por vía seca y por vía húmeda. La mayor concienciación a nivel mundial con el medio ambiente y el reconocimiento del papel clave desempeñado por el agua también han favorecido una mayor preferencia por la vía seca. En este contexto el objetivo del presente trabajo consiste en analizar la viabilidad de la producción de baldosas de gres porcelánico de alta calidad por vía seca. Una breve comparación entre la vía seca y la húmeda, en condiciones estándar utilizadas industrialmente hoy en día para la elaboración de baldosas no porcelánicas, revela que las principales diferencias entre ambas técnicas son las siguientes:

- 1) los tamaños de las partículas obtenidas por vía húmeda son habitualmente mucho más finos y
- 2) la capacidad de mezcla de diferentes materiales, el grado de intimidad alcanzado en la mezcla, es también habitualmente mejor en la vía húmeda.

El presente trabajo analiza la importancia relativa de estas diferencias y examina las materias primas y condiciones operacionales que llevarían a mejores resultados en la fabricación de baldosas de gres porcelánico esmaltado de buena calidad.

1. INTRODUCCIÓN

La “vía seca” puede considerarse como la mayor innovación tecnológica de la industria brasileña de baldosas cerámicas [1]. Durante los últimos cinco años la producción brasileña de estas baldosas ha experimentado sorprendentes tasas de crecimiento. El rápido crecimiento en la elaboración de productos fabricados por vía seca, que representa cerca del 70% de la producción brasileña, es el responsable de este importante logro. La calidad de los productos elaborados por vía seca también ha mejorado considerablemente y en la actualidad la gran mayoría de los ellos cumple con todas las exigencias de las normas internacionales y es muy difícil el distinguir entre las baldosas elaboradas por vía seca y por vía húmeda.

Entre las diferentes tipologías de baldosas, la elaboración de baldosas de gres porcelánico [2] merece una atención especial, en primer lugar porque ha aportado un importante componente de valor añadido a las baldosas cerámicas y además porque ha penetrado en las clases de consumidores que normalmente preferirían productos más nobles como la piedra natural. El aumento en la producción de baldosas de gres porcelánico también se ha producido en Brasil, donde dichos productos se elaboran mediante la vía húmeda tradicional.

Así, considerando toda la información presentada y dos de las características más atractivas de la vía seca, que consume aproximadamente un 30% [7] menos de energía térmica y que es ecológicamente más adecuada ya que no utiliza agua en la elaboración del soporte, merece la pena analizar la posibilidad de elaborar baldosas de gres porcelánico de buena calidad por vía seca.

Considerando las principales diferencias entre los procesos por vía seca y por vía húmeda, existen algunas barreras tecnológicas importantes que han de superarse para la elaboración de baldosas de porcelana de alta calidad por vía seca:

1. El **tamaño de partícula** producido por vía húmeda es considerablemente más fino que el producido por vía seca en las condiciones de operación normalmente utilizadas para elaborar productos BIIb en Brasil;
2. El **grado de mezcla** de los diferentes minerales presentes en las distintas materias primas utilizadas en la formulación de los soportes, y en conse-

cuencia la homogeneidad de la composición, alcanzada por vía húmeda es considerablemente mejor que el conseguido por vía seca [3];

3. Los **gránulos** producidos por atomización son más esféricos y de mayores dimensiones que aquellos obtenidos por vía seca [4]. En consecuencia, la fluidez [5] del polvo granulado producido por vía húmeda tiende a ser considerablemente mayor que la producida por vía seca donde la forma de los gránulos es bastante más irregular;
4. Los **defectos** que se obtienen como consecuencia de la presencia de minerales no deseables, como la calcita, son habitualmente más importantes en los procesos por vía seca, ya que en las condiciones operativas utilizadas para producir productos BIIb las partículas son bastante más gruesas [3];
5. La **aspereza de la superficie** [6] de los productos elaborados por vía seca tiende a ser mayor debido a la existencia de partículas más gruesas producidas por vía seca.

El presente trabajo analiza los elementos 1 y 2 con el objetivo de identificar alternativas para superar o minimizar estas barreras. Para alcanzar dicho objetivo el trabajo experimental se ha subdividido en tres partes, indicadas a continuación.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Relevancia del tamaño de partícula y del grado de mezcla.

A nivel de laboratorio se elaboró una composición para el soporte (tabla I), originalmente utilizado para la fabricación de baldosas de gres porcelánico esmaltado por vía húmeda, mediante tres vías alternativas:

- Vía húmeda: la composición fue preparada en un molino de bolas mediante la incorporación de agua y silicato sódico, como desfloculante, hasta alcanzar un residuo inferior al 5,0% en un tamiz ASTM #325 (apertura de 45µm). Posteriormente, las suspensiones fueron secadas y granuladas mediante la incorporación de 7,0% de agua;
- Vía seca: la composición se preparó en un molino de martillo y mortero hasta alcanzar un residuo a través de un tamiz ASTM #45 (apertura de 350µm). Esta condición produce distribuciones de tamaño de partícula similares a las encontradas en las industrias brasileñas que producen baldosas BIIb por vía seca. Después de la molturación, el polvo fue granulado mediante la incorporación de 7,0% de agua;
- Vía mixta: las materias primas fueron elaboradas individualmente en húmedo hasta retener menos de un 5,0% en un tamiz ASTM # 325 (apertura de 45µm). Después de la molienda, las materias primas individuales fue-

ron secadas, dosificadas según la composición (tabla I) y mezcladas por vía seca. La composición preparada mediante este procedimiento reveló aproximadamente la misma distribución de tamaño de partícula respecto a uno de las composiciones elaboradas por vía húmeda, sin embargo, el grado de mezcla fue similar al obtenido por vía seca. La mezcla de materias primas se granuló mediante la incorporación de 7,0% de agua;

Materia prima	Composición (%)
Arcilla P	19,6
Arcilla ME	3,5
Arcilla SH	4,7
Feldespatio sódico	23,4
Filito FT1	28,1
Filito FT 5	13,2
Talco TC2	7,5

Tabla I. Materias primas y composición del soporte.

La distribución granulométrica de los tres polvos se determinó mediante sedimentación y tamizado húmedo, para las fracciones más gruesas.

Posteriormente, se procedió a clasificar comparativamente las composiciones elaboradas mediante los procedimientos descritos anteriormente. Las muestras fueron elaboradas mediante prensado y la densidad aparente después del secado alcanzó los 1,90 g/cm³ para las tres muestras. Después del secado las muestras fueron cocidas a diferentes temperaturas en ciclos de alrededor de 45 minutos de duración. Seguidamente, se procedió a medir la absorción de agua y la contracción en cada una de las muestras.

2.2. Efectos del tamaño de partícula sobre la vía seca.

La composición presentada en la tabla I fue elaborada en el laboratorio mediante un molino de martillo y mortero para producir diferentes tamaños de partículas con la misma composición química:

- 100% de paso a través de un tamiz 45 ASTM (apertura de 350µm);
- 100% de paso a través de un tamiz 80 ASTM (apertura de 180µm);
- 100% de paso a través de un tamiz 140 ASTM (apertura de 105µm);
- 100% de paso a través de un tamiz 230 ASTM (apertura de 63µm);

La distribución granulométrica, la preparación de las muestras, las condiciones de procesamiento y la caracterización, son las mismas que las descritas en la sección anterior.

Para complementar el estudio de los efectos del tamaño de partícula sobre la vía seca, se procedió a calcular el coeficiente de dilatación térmica y el índice de

piroplasticidad para las muestras cocidas a temperaturas equivalentes a la máxima tasa de densificación.

2.3. Composiciones de soportes compatibles con la vía seca.

Se analizaron las composiciones que contienen otras materias primas, distintas de aquellas indicadas en la tabla I, y más compatibles con las características de la molturación en seco. Las pautas generales para la elección de las materias primas son las siguientes:

- Arcillas con un bajo contenido de humedad, únicamente sujetas a la acción de agentes atmosféricos, para evitar la necesidad de contar con una etapa de secado previa;
- Formulaciones con un contenido muy bajo o nulo de materias primas duras, que aumentarían el desgaste de los molinos y disminuirían su productividad;
- Composiciones con menores componentes que tienen características similares, para evitar heterogeneidades como consecuencia de la menor capacidad de mezclado típica de la vía seca.

Las composiciones descritas en la tabla II fueron evaluadas después de la molienda en seco (molino de martillo y mortero) con tamaños de partícula inferiores a $63\mu\text{m}$ (100% de paso a través de tamices de 230 ASTM). Las siguientes características fueron medidas para las diferentes muestras:

- Curvas de compactación: para las composiciones con contenidos fijos de humedad de 8,0% y presiones de compactación entre 150 y 400 Kg/cm²;
- Módulo de ruptura (ensayo de flexión) después del secado: mediante el ensayo de flexión en tres puntos para las muestras prensadas a diferentes presiones de compactación;
- Curvas de gresificación: determinadas después de la cocción en ciclos de alrededor de 45 minutos, con temperaturas máximas entre 1140 y 1220°C;
- Módulo de ruptura (ensayo de flexión) después de la cocción: mediante el ensayo de flexión en tres puntos para las muestras cocidas a temperaturas utilizadas para las curvas de gresificación;
- Índice pirolástico, coeficiente de dilatación térmica y color y textura después de la cocción (análisis visual y colorimétrico en espectrofotómetro) para las muestras cocidas a la máxima temperatura de densificación determinada por las curvas de gresificación de cada composición.

Materia Prima	P10	P11	P12
Arcilla blanca	40	45	45
Filito	45	45	40
Arcilla roja 1	-	10	-
Arcilla roja 2	-	-	10
Talco	5	-	5
Feldespató sódico	10	-	-

Tabla II. Composiciones de las baldosas de gres porcelánico ensayadas elaboradas por vía seca.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Relevancia del tamaño de partícula y del grado de mezcla.

La figura 1 muestra la distribución granulométrica para los polvos preparados mediante los tres procesos. Tal como se esperaba, las distribuciones granulométricas de las composiciones preparadas por las vías “húmeda” y “mixta” son muy similares. No obstante, la composición preparada por vía seca presentó una distribución granulométrica mucho más ancha, con un mayor contenido de partículas gruesas.

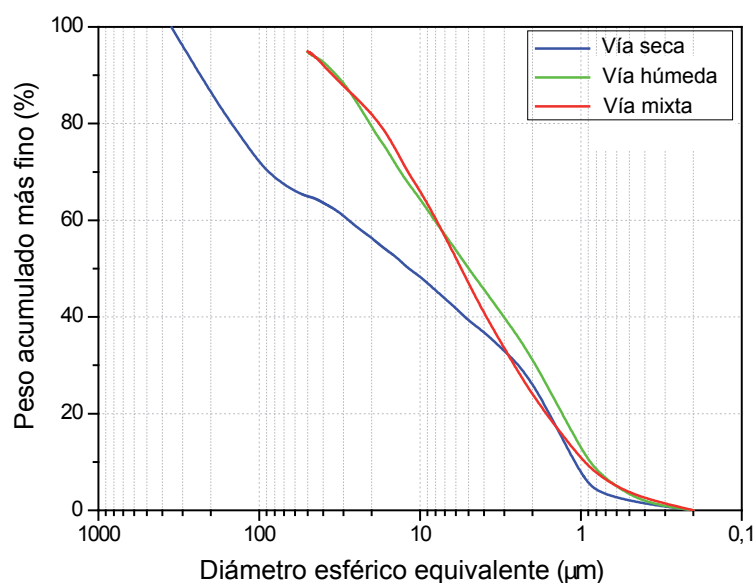


Figura 1. Distribuciones granulométricas de los polvos preparados mediante diferentes vías.

La figura 2 muestra las curvas de gresificación de las muestras preparadas mediante las tres vías. Los resultados indican que la fundencia de las mezclas está altamente influenciada por el método de preparación. Además, se ha encontrado que las curvas de gresificación de las muestras preparadas por las vías “húmeda” y “mixta” eran bastante similares. No obstante, la muestra preparada mediante la vía seca presentó una baja fundencia y en consecuencia requería temperaturas considerablemente mayores para alcanzar la absorción de agua necesaria para caracterizar a una baldosa de gres porcelánico. Estos resultados indican que, desde el punto de vista del comportamiento en la cocción, el tamaño de las partículas es

considerablemente más relevante que el grado de mezclado. Sin embargo, desde el punto de vista del aspecto visual, una característica que también es muy importante, el grado de mezcla juega un papel muy importante y las muestras preparadas mediante vía seca, desde el punto de vista de la homogeneidad del color, presentan una superficie muy heterogénea con pigmentaciones visibles a simple vista y una textura ligeramente más gruesa.

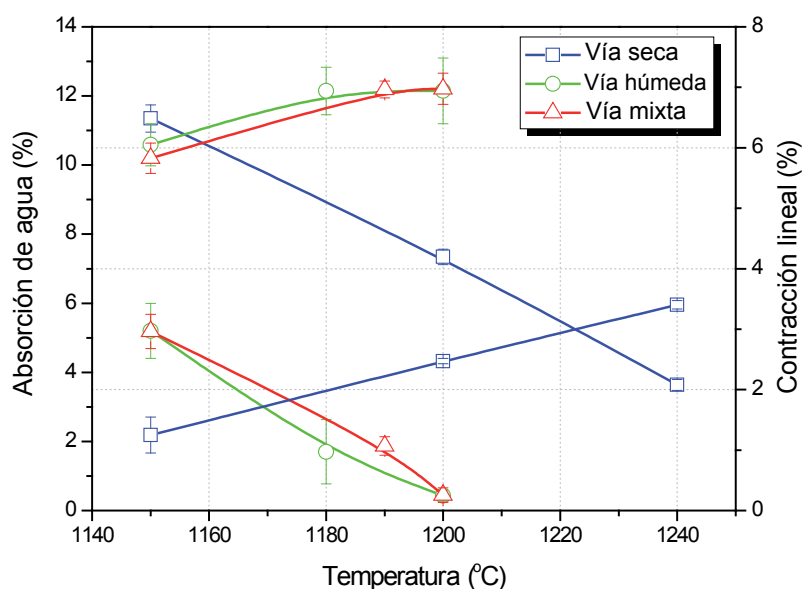


Figura 2. Curvas de gresificación de las composiciones preparadas por vías diferentes.

3.2. Efectos del tamaño de partícula sobre la vía seca.

Los resultados de la sección anterior muestran que, desde el punto de vista del comportamiento en la cocción es necesario centrarse en la búsqueda de partículas finas, sin embargo la producción de partículas más finas reduce la producción del molino. En consecuencia, es necesario concentrarse en partículas que sean lo suficientemente finas, intentando evitar la pérdida de productividad del molino y la pigmentación del soporte cerámico. En este escenario no es necesario estudiar los efectos del tamaño de las partículas sobre la vía seca para determinar lo fino que debe ser el polvo para producir la fundencia necesaria sin la pigmentación del soporte cerámico. Es importante señalar que la producción de partículas más finas normalmente conduce a una importante pérdida de productividad del molino en seco, de forma que es necesario determinar el tamaño máximo de partículas que permitirá aprovechar las características de la vía seca, mencionada anteriormente, sin comprometer la estética del producto final. Este es el objetivo de esta parte del trabajo.

El proceso de molturación en seco se ajustó para producir polvos con las mismas composiciones químicas y mineralógicas y diferentes distribuciones de tamaño de partícula (figura 3). Para fines de comparación, la figura 3 también muestra la distribución granulométrica de las composiciones preparadas mediante

vía húmeda. Las muestras con partículas más pequeñas que 105 y 63 μm tienen distribuciones de tamaño de partícula similares a la elaborada por vía húmeda.

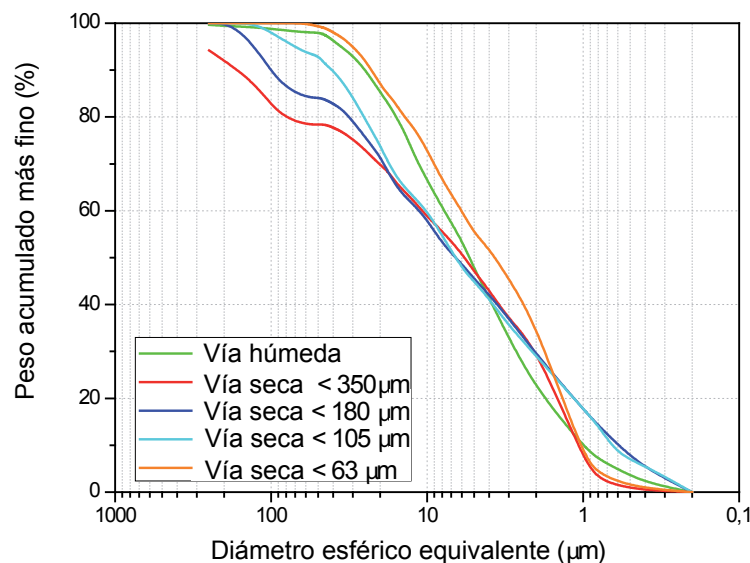


Figura 3. Distribuciones granulométricas de las muestras molturadas en seco.

La curva de gresificación de la muestra molturada en seco que contiene partículas más pequeñas que 63 μm es muy similar a la curva correspondiente a la muestra preparada mediante vía húmeda, en la figura 4. También se alcanzaron resultados satisfactorios en la muestra que contiene partículas más pequeñas que 105 μm , aunque en este caso se observa una desaceleración del proceso de gresificación. Las muestras que contienen partículas más gruesas presentan una fuerte pigmentación y una menor fundencia, lo cual requiere mayores temperaturas para alcanzar la absorción de agua necesaria.

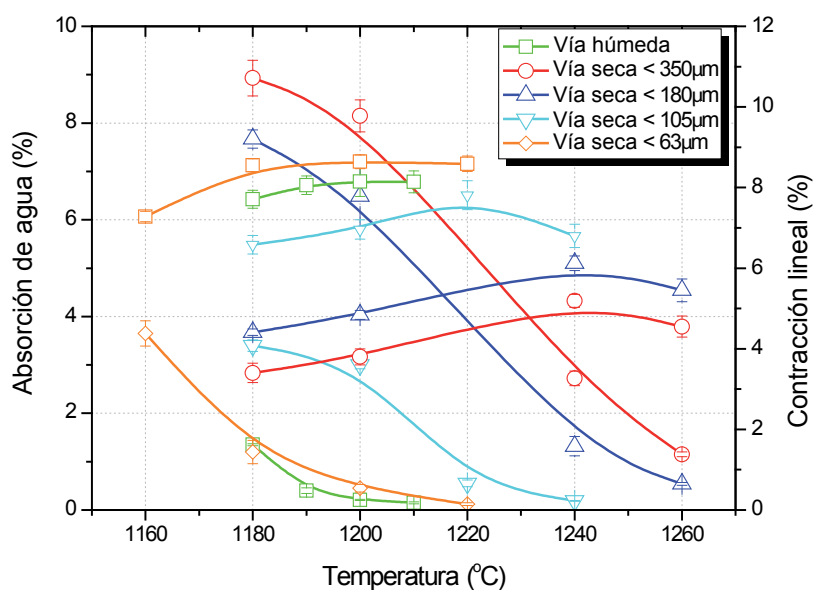


Figura 4. Curvas de gresificación de las muestras con diferentes tamaños de partículas elaboradas mediante molienda en seco.

La tabla III muestra los coeficientes de dilatación térmica y los índices piroplásticos de las muestras con diferentes tamaños de partículas. Los coeficientes

de dilatación térmica no pueden ser demasiado bajos para permitir el desarrollo de esmaltados compatibles que acabarán en curvaturas aceptables en el producto final. Además, el índice piropástico debería reducirse para evitar que se produzcan distorsiones durante la cocción.

Se observa que las muestras más gruesas, cocidas a altas temperaturas, necesarias para alcanzar la absorción de agua requerida, presentaban un mayor índice de piroplasticidad (IP) y menores coeficientes de dilatación térmica. Estas diferencias probablemente se deben a la disminución en la viscosidad del vidrio a temperaturas altas, lo cual favorecería la deformación piropástica, y al incremento en el cuarzo cristalino disuelto en el líquido fundido, lo que a su vez produciría una disminución en el coeficiente de dilatación térmica.

Mezcla de la composición	$\alpha_{25-325} (^{\circ}\text{C}^{-1})$	I.P. (cm^{-1})
100% < 350 μm	$58,3 \times 10^{-7}$	$18,5 \times 10^{-5}$
100% < 180 μm	$56,8 \times 10^{-7}$	$17,5 \times 10^{-5}$
100% < 105 μm	$59,7 \times 10^{-7}$	$14,4 \times 10^{-5}$
100% < 63 μm	$65,6 \times 10^{-7}$	$9,4 \times 10^{-5}$
Vía húmeda	$66,2 \times 10^{-7}$	$7,6 \times 10^{-5}$

Tabla III. Tamaños de partícula y sus correspondientes coeficientes de dilatación térmica e índice de piroplasticidad para las muestras elaboradas por vía seca.

En consecuencia, se puede concluir que para las composiciones analizadas puede alcanzarse una buena fundencia sin pigmentación con partículas más pequeñas que 63 μm y que además es posible conseguir resultados satisfactorios para partículas más pequeñas que 105 μm .

3.3. Composiciones del soporte compatibles con la vía seca.

En esta parte del trabajo se utilizaron nuevas materias primas, diferentes de las presentadas en la tabla I, y más compatibles con las características de la vía seca utilizada.

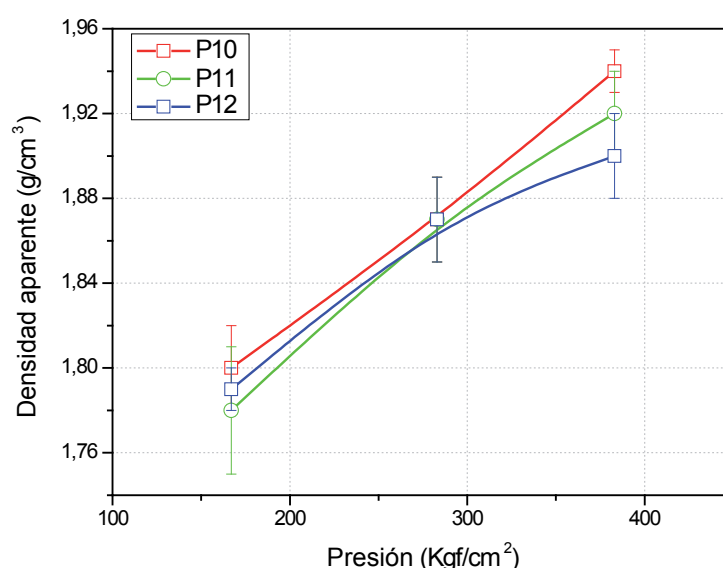


Figura 5. Curvas de compactación de las composiciones de soportes porcelánicos elaborados por vía seca.

La figura 5 muestra las curvas de compactación de las tres distintas composiciones formuladas para esta parte del trabajo. Los resultados indican que la densidad aparente de las tres composiciones ha aumentado con presiones crecientes y que alcanzan densidades aceptables para presiones de compactación similares a aquellas practicadas en la fabricación de baldosas de gres porcelánico esmaltadas. Se observa que la composición P10 alcanzó una mayor densidad aparente, probablemente debido a la presencia de feldespato que permitió la introducción de partículas más gruesas.

La tabla IV muestra que estas composiciones también presentan un comportamiento mecánico satisfactorio antes del cocido. Los módulos de ruptura en seco de las tres composiciones elaboradas por vía seca son similares a los de las composiciones preparadas por vía húmeda, caracterizadas para fines de comparación.

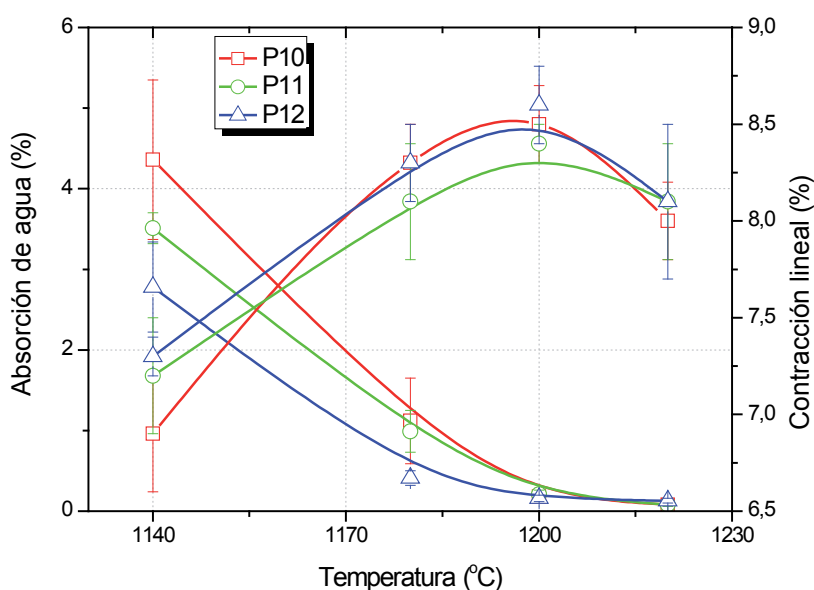


Figura 6. Curvas de gresificación para las formulaciones de baldosas de gres porcelánico elaboradas por vía seca.

Características	Vía húmeda	P10	P11	P12
Densidad aparente 110°C (g/cm ³)	1,91	1,95	1,92	1,90
Resistencia mecánica 110°C (MPa)	3,7	2,4	2,8	4,2
Densificación a temperatura máxima (°C)	1190	1200	1200	1190
Pérdida por calcinación (%)	4,9	4,8	4,2	4,5
Absorción de agua (%)	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Contracción lineal en cocido (%)	7,2	8,2	8,0	8,3
Resistencia mecánica T _{max} (MPa)	51	48	48	52
Dilatación térmica- α_{25-325} (°C ⁻¹)	68,2	64,6	66,1	65,6
Índice de piroplasticidad (cm ⁻¹)	7,6	6,9	5,7	6,4
Coordenadas cromáticas - L*, a*, b*	57,2	56,7	53,3	53,1
	1,2	1,4	3,4	2,0
	12,5	12,0	12,3	11,4

Tabla IV. Características de las composiciones analizadas.

La figura 6 muestra las curvas de gresificación para las composiciones. Todas las composiciones ensayadas presentan una máxima densificación a una temperatura en torno a los 1200°C y alcanzaron valores de absorción de agua inferiores al 0,5% a temperaturas entre 1180 y 1190°C en ciclos de cocción de 45 minutos. La presencia de feldespato en la composición P10 no produjo una tasa de gresificación superior. La composición P12, que consiste únicamente en arcillas, filito y talco demostró ser la menos refractaria entre las formulaciones sometidas a análisis. El desarrollo de formulaciones libres de feldespato puede ser interesante para el proceso por vía seca, ya que debido a la dureza de los feldespatos, se espera que las composiciones libres de dicha materia prima muestren una mayor eficacia de molienda y un menor desgaste de los equipos.

Las otras propiedades de las composiciones durante y después de la cocción se presentan en la tabla IV, junto con los valores obtenidos por las baldosas de gres porcelánico esmaltado elaboradas por el método de la vía húmeda.

Comparando los resultados de las composiciones por vía seca en la tabla IV, se puede apreciar que existen algunas diferencias sutiles en el color, dilatación térmica, piroplasticidad y resistencia mecánica en seco. En general, las propiedades de las composiciones elaboradas por vía seca son muy similares a las propiedades de las composiciones preparadas por la vía húmeda.

4. CONCLUSIONES

En base a los resultados, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Se han obtenido resultados satisfactorios a escala de laboratorio para la producción de gres porcelánico esmaltado, de color claro (blanquecino), fabricado por vía seca;
- El tamaño de las partículas es más relevante que el grado de mezcla para el proceso de gresificación de los polvos preparados mediante vía seca;
- No es posible conseguir piezas de gres porcelánico de color claro (blanquecino) con los tamaños de partículas actualmente utilizados en las plantas brasileñas de elaboración por vía seca. Es necesario obtener partículas más pequeñas que 105µm o preferiblemente más pequeñas que 63µm para alcanzar resultados satisfactorios;
- Es posible desarrollar composiciones de gres porcelánico más compatibles con las características del proceso por vía seca. La selección adecuada de las materias primas termina en productos que cumplen con todas las características técnicas necesarias y se benefician de la alta productividad y de los aspectos medioambientales de la vía seca.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de FAPESP Process no 2008/58972-0.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BOSCHI, A.O. The Brazilian ceramic tile industry. Reasons of success. **Ceramic Forum International**. 85, n.9, p. E92-E94, 2008.
- [2] SANCHEZ, E. Consideraciones técnicas sobre el producto y el proceso de fabricación del gres porcelánico. **VII Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerâmico – Qualicer**, v.1, Con. 56 – 83, España, 2002.
- [3] NASSETTI, G.; PALMONARI, C. - "Dry fine grinding vs. wet grinding and spray drying in the preparation of a redware mix for fast-single-fired vitrified tile" - **Ceram. Eng. Sci. Proc.** 14 [1-2] 15-24,1993.
- [4] GHORRA, G. - "Wet vs. dry processing: granulation of ceramic powders" - **Ceram. Eng. Sci. Proc.** 10 [1-2] 18-35, 1989.
- [5] QUINTEIRO, E. - "*Efeito das características de pós atomizados sobre as características e qualidade de revestimentos cerâmicos*" - Master's Dissertation, UFSCar, São Carlos, Brasil (1996).
- [6] PARRA, B.S. et al. Rugosidade superficial de revestimentos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 11, no 2, p. 15-18, 2006.
- [7] ALVES, H.J.; MELCHIADES, F.G.; BOSCHI, A.O. Levantamento inicial do consumo de energias térmica e elétrica na indústria brasileira de revestimentos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 12, no 1/2, p. 17-21, 2007.