

BALDOSAS CERÁMICAS OBTENIDAS A PARTIR DE RESIDUOS DE VIDRIO DE ENVASE

Maisa Topanotti Daros⁽¹⁾, Diana de Souza Felisberto⁽¹⁾, Aline da Silva Pereira⁽¹⁾,
Cláudio Roberto Peixoto Pessoa⁽¹⁾, Adriano Michael Bernardin^(1,2)

⁽¹⁾Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense,
Criciúma, Santa Catarina, Brasil

⁽²⁾Tecnologia em Cerâmica, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial,
Tijucas, Santa Catarina, Brasil
adriano@unescc.net

RESUMEN

La compactación de polvo es una ruta popular de producir componentes, seguida de la sinterización en caliente. La densificación se produce por deslizamiento y reordenación de las partículas de polvo a bajas presiones, lo cual lleva a una reorganización del polvo desde una ordenación suelta hasta un empaquetamiento compacto. En este trabajo se estudió el comportamiento de compactación de las partículas de vidrio. Los residuos de vidrio de envase fueron molidos y prensados para obtener baldosas cerámicas. Un planteamiento de diseño factorial 3^k fue usado para estudiar la influencia del tiempo de molturación, ligante y adición de plastificador, y presión de prensado en la densidad aparente y carga de fractura de las baldosas. Los resultados muestran la influencia de la distribución granulométrica en el comportamiento de compactación de las baldosas cerámicas.

1. INTRODUCCIÓN

La compactación del polvo es una ruta popular para la producción de componentes, seguido de la sinterización en caliente. Generalmente, la mayor parte de la densificación se da en la fase de consolidación en frío^[1-2]. A un nivel fundamental, la densificación se da simplemente por el movimiento de los centros de las partículas entre sí, a través de varias fases. La primera fase del proceso de compactación es la de deslizamiento y reordenación de las partículas de polvo a baja presión, lo que lleva a una reordenación del polvo de suelto a compacto. A una densidad relativa determinada, las partículas están colocadas de forma más o menos fija. Debido a la resistencia de un material contra la deformación, la tensión interna de las partículas aumenta. Si la tensión aplicada es liberada antes de un estado crítico de deformación, las partículas se deforman elásticamente, es decir, la deformación es reversible, y las partículas que están en el interior del asiento del polvo recobran sus formas originales. En la siguiente fase, para los sistemas frágiles, las partículas se fragmentan en unidades más pequeñas a la resistencia de fractura, σ_f . La fractura del material se dará, eventualmente, a niveles de deformación más altos. Los resultados de compresibilidad se dan cuando las partículas de polvo son endurecidas por tensión durante la desintegración^[1, 3-6].

Hay muchos parámetros efectivos en el comportamiento de compresibilidad de los materiales, como las características intrínsecas del material, deformabilidad, morfología, forma de la partícula, fricción entre partículas y partícula/matriz^[10], porosidad interna, distribución del tamaño de partícula, presión que se aplica a la consolidación, etc. Al aumentar la presión aplicada, la densidad de la masa del polvo se incrementa o bien se reduce la porosidad. La determinación del comportamiento en la densificación del polvo está, por regla general, basada en la medida de la densidad relativa del lecho del polvo, como una función de la presión de compactación. De todas formas, no hay expresiones que estén completamente aceptadas para describir de forma precisa la medida de densificación contra la presión aplicada para los polvos, aunque se han sugerido muchas ecuaciones de compactación^[1, 7-9].

Usualmente se emplearon ecuaciones de compactación para desarrollar una relación lineal entre presión y densidad relativa. Por lo tanto, sería posible comparar entre una serie de datos y/o predecir una presión requerida para obtener un cierto nivel de densidad. Algunos investigadores han intentado correlacionar estos parámetros con ecuaciones matemáticas para determinar el efecto de la molturación mecánica en la morfología de polvos y han relacionado el comportamiento de compactación de los polvos con las evoluciones microestructurales que se han dado durante la molturación^[1, 3-7].

La adición de ligantes orgánicos en polvos cerámicos granulados aumenta considerablemente la resistencia mecánica del producto ecológico. Cuando el ligante es dúctil (una temperatura de transición de vidrio inferior a la temperatura de formación), la resistencia mecánica se incrementa de forma rápida y lineal con la presión de formación hasta que alcanza una meseta superior a la presión de transición. La principal contribución del ligante a la resistencia mecánica se atribuye al ligante localizado en el interior de los gránulos con una baja contribución de la corteza rica en orgánicos alrededor de los gránulos^[10].

La evolución de la resistencia mecánica es el resultado, probablemente, de un incremento en la superficie de contacto de los puentes del polímero entre las partículas cerámicas primarias que se consideran cubiertas por una película de ligante. La

estimación de la energía de fractura de los compactos ecológicos prensados sugiere que se da una deformación plástica durante el fallo. Cuando la temperatura de transición del vidrio del ligante es mayor que la temperatura de prensado, el micro envase de las carcasas ricas en polímero que hay alrededor de los gránulos parece ser responsable de los valores bajos de resistencia mecánica hasta que la presión que se está formando se hace lo suficientemente grande para cerrar estas micro grietas a través de la densificación del montaje total. Entonces, la resistencia mecánica se incrementa rápidamente^[10].

En este trabajo se estudia el comportamiento de compactación de las partículas de vidrio. Los residuos de vidrio de envase fueron molidos y prensados para obtener baldosas cerámicas. Un planteamiento de diseño factorial fue usado para estudiar la influencia del tiempo de molturación, adición de ligante y plastificador y presión de prensado.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se recogieron, lavaron y fragmentaron los residuos de vidrio de envase. Un diseño factorial 3^{k-1} fue usado para determinar el comportamiento de compactación de residuos de vidrio. Se usaron tiempo de molturación (8h, 12h y 16h), contenido aditivo (0.25%/0.25%, 0.50%/0.50% y 0.75%/0.75%) y presión de prensado (300kgf/cm², 400kgf/cm² y 500kgf/cm²) como factores principales dando un diseño factorial fraccionado con nueve ciclos. Los vidrios fragmentados fueron molturados con agua en un laboratorio de acuerdo con los tiempos de molturación de diseño y contenido aditivo. Tras la molturación, la barbotina fue secada (a 110°C, 24h) y el polvo granulado con un 6% de agua. Se usó alcohol de polivinilo como ligante y resina acrílica como plastificador. Los polvos granulados fueron compactados en una prensa de laboratorio de acuerdo con el diseño en compactos de 20mm x 120mm. Finalmente, la densidad aparente (método de inmersión) y la fractura en cargas máximas (ISO 10545) de los compactos fueron determinadas para los 9 ciclos. Los resultados fueron analizados por análisis de varianza (ANOVA) y representados como superficies de respuesta.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 1 muestra los resultados para la densidad aparente y la fractura a la carga máxima para el diseño factorial 3^{k-1} .

CICLO	TIEMPO DE MOLTURACIÓN(h)	ADITIVO (%)	COMPACTACIÓN (kgf/cm ²)	DENSIDAD (g/cm ³)	RUPTURA (kgf)
1	8	0.25/0.25	300	1.360±0.015	2.35±0.57
2	8	0.50/0.50	500	1.400±0.019	2.85±0.36
3	8	0.75/0.75	400	1.300±0.032	2.29±0.30
4	12	0.25/0.25	500	1.403±0.050	1.49±0.19
5	12	0.50/0.50	400	1.232±0.024	1.84±0.51
6	12	0.75/0.75	300	1.169±0.008	0.86±0.19
7	16	0.25/0.25	400	1.155±0.018	1.37±0.28
8	16	0.50/0.50	300	1.069±0.010	1.57±0.15
9	16	0.75/0.75	500	1.109±0.007	1.75±0.28

Tabla 1. La densidad aparente (g/cm³) y la ruptura a la carga máxima (kgf) en función del tiempo de molturación (h), contenido de aditivo (%) y presión de compactación (kgf/cm²)

Los resultados de la densidad aparente fueron analizados por ANOVA, tabla 2. El principal efecto es causado por el tiempo de molturación a un nivel de significancia elevado (99%). Las interacciones del factor no fueron consideradas porque el diseño está fraccionado. La figura 1 muestra los gráficos de superficie de respuesta para la densidad aparente.

DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)	SS	dF	MS	F	P
Tiempo de molturación	0.090656	2	0.045328	103.6203	0.009558
Contenido de aditivo	0.019758	2	0.009879	22.5829	0.042404
Presión de compactación	0.017460	2	0.008730	19.9571	0.047717
Error SS total	0.000875	2	0.000437		
SS total	0.128749	8			

Tabla 2. ANOVA para la densidad aparente en función del tiempo de molturación (h), contenido de aditivo (%) y presión de compactación (kgf/cm²)

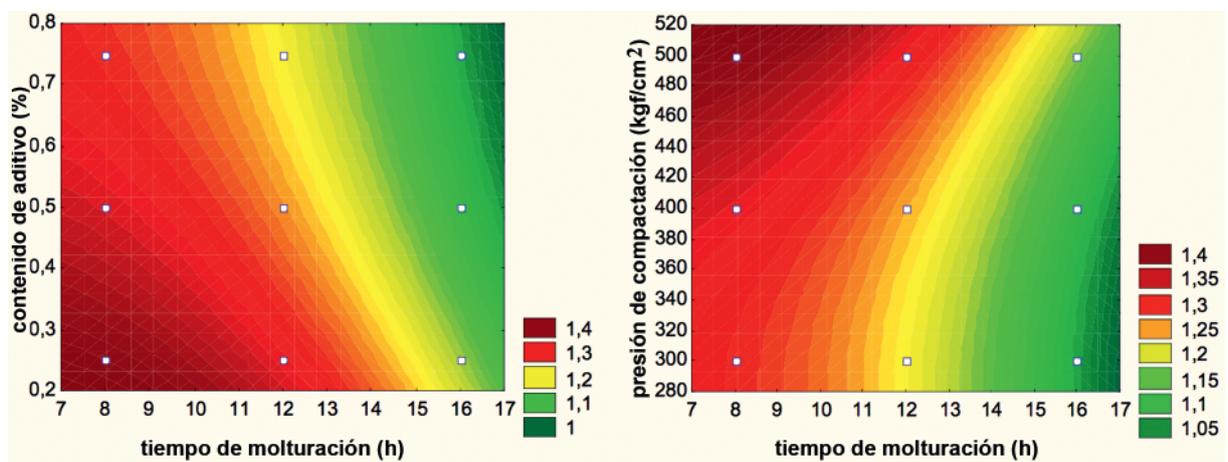


Figura 1. Superficie de respuesta para la densidad aparente de vidrios compactados.

La densidad aparente se ve fuertemente afectada por el tiempo de molturación. La combinación de tiempo de molturación (8h) con una presión de compactación alta (500kgf/cm²) y una pequeña cantidad de aditivos (0.25% PVA y 0.25% resina acrílica) da como resultado el mejor sistema de empaquetamiento. El ajuste del modelo es muy alto (R²=0.993), validando el análisis.

La tabla 3 muestra el análisis de la varianza (ANOVA) para la ruptura en carga máxima. Una vez más el efecto principal es causado por el tiempo de molturación a un nivel de significancia alto (94%). Las interacciones del factor no fueron tenidas en cuenta porque el diseño está fraccionado. La figura 2 muestra los gráficos de la superficie de respuesta para la ruptura en carga máxima.

RUPTURA A CARGA MÁXIMA (kgf)	SS	dF	MS	F	p
Tiempo de molturación	2.108889	2	1.054444	16.35361	0.057625
Contenido aditivo	0.338689	2	0.169344	2.62640	0.275756
Presión de compactación	0.286956	2	0.143478	2.22523	0.310056
Error SS total	0.128956	2	0.064478		
SS total	2.863489	8			

Tabla 3. ANOVA para ruptura en función del tiempo de molturación (h), contenido aditivo (%) y presión de compactación (kgf/cm²)

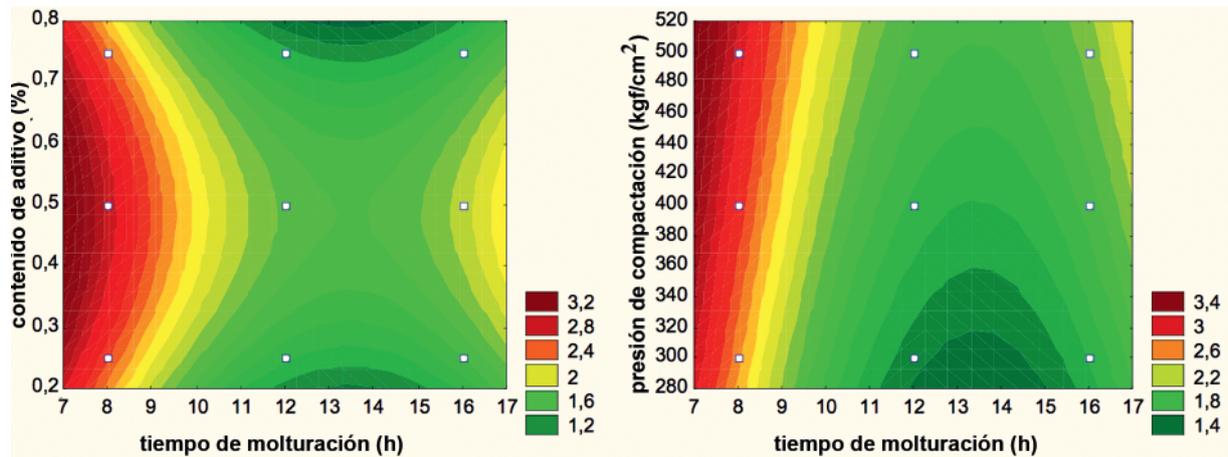


Figura 2. Superficie de respuesta para la ruptura a una carga máxima de los vidrios compactados

La ruptura a la carga máxima se ve también fuertemente afectada por el tiempo de molturación. La combinación de 8 h de molturación con una presión de compactación alta (500kgf/cm²) y una cantidad media de aditivos (0.50% PVA y 0.50% de resina acrílica) da como resultado el mejor sistema de empaquetamiento. El ajuste del modelo es muy alto ($R^2=0.955$), validando el análisis.

Finalmente, la figura 3 muestra la morfología de las partículas tras la molturación. Las 8 h de molturación presentan una distribución de partículas de gran tamaño, con partículas que van de los 10 μ m a los 30 μ m. El tiempo de molturación de 16h muestran una distribución de partículas reducidas, con partículas que van desde los 5 μ m a los 15 μ m. La distribución del tamaño de partículas no fue llevada a cabo, por lo que este análisis es solo cualitativo, basado en las micrografías.

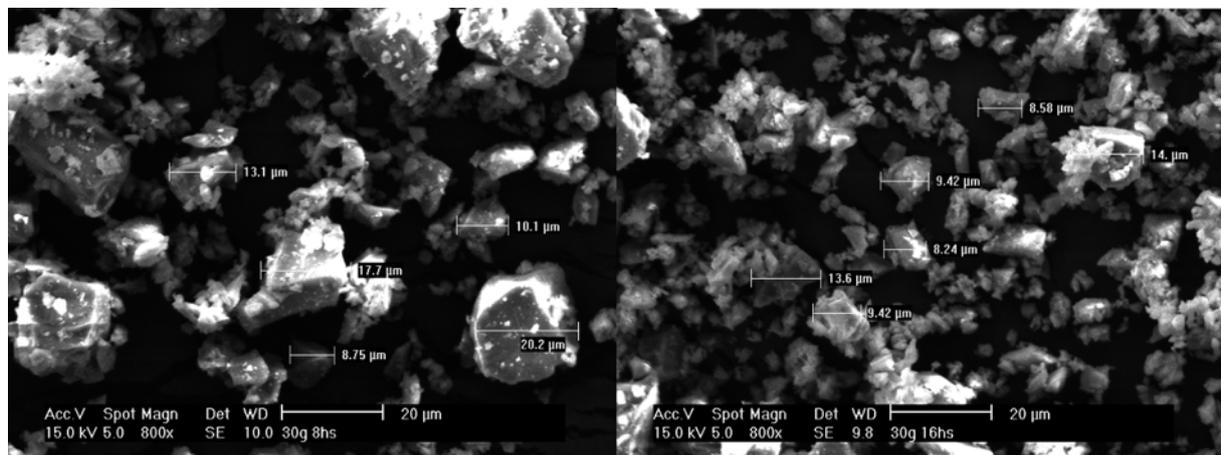


Figura 3. Morfología de la partícula tras tiempos de molturación de 8h y de 16 h

4. CONCLUSIÓN

El reciclado de los residuos de vidrio en baldosas cerámicas es una forma fácil y eficaz de reducir la eliminación de esta clase de residuos. Debido a que el residuo de vidrio es la única materia prima y a que el residuo puede ser procesado en una

planta de cerámica normal, sin ninguna clase de adaptación, la solución podría ser rápidamente adoptada para transformar los residuos vítreos de plantas incineradoras municipales en baldosas cerámicas. El proceso es ecológico ya que usa residuos y no crea residuo alguno. Sólo el agua y pequeñas fracciones de aditivos orgánicos son usadas en este proceso, dando como resultado productos con un gran mercado y bien consolidado.

Con respecto a los resultados obtenidos en este trabajo preliminar, la densidad aparente y la fractura durante la carga se ven fuertemente afectadas por el tiempo de molturación. La combinación de un tiempo de molturación reducido con altas presiones de compactación y una cantidad de aditivos de pequeña a media da como resultado el mejor empaquetamiento del sistema. La distribución del tamaño de partícula del residuo de vidrio es el factor más importante a tener en cuenta en la compactación de materiales frágiles no plásticos. El siguiente paso es el estudio del comportamiento en la sinterización del sistema de vidrio compactado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Abdoli, H.; Farnoush, H.; Salahi, E.; Pourazrang, K. *Materials Science & Engineering A* (2007) doi:10.1016/j.msea.2007.09.034.
- [2] Martin, C.L.; Bouvard, D. *Acta Mater.* 51 (2003) 373-386.
- [3] Skrinjar, O.; Larsson, P.-L. *Acta Mater.* 52 (2004) 1871-1884.
- [4] Hewitt, R.L.; Wallace, W.; Malherbe, M.C. *Powder Metall.* 17 (33) (1974) 1.
- [5] Seeling, P.R.; Wulff, J. *Trans. AIME* 166 (1946) 492-500.
- [6] Poquillon, D.; Lemaitre, J.; Baco-Carles, V.; Tailhades, Ph. ; Lacaze, J. *Powder Technology* 126 (2002) 65-74.
- [7] Moon, I.M.; Choi, J.-S.; *Powder Metall.* 28 (1) (1985) 21-28.
- [8] Hentschel, M.L.; Page, N.W. *J. Mater. Sci.* 42 (2007) 1261-1268.
- [9] Kim, K.T.; Cho, J.H.; Kim, J.S. *ASME J. Eng. Mat. Tech.* 122 (2000) 119-128.
- [10] Baklouti, S.; Chartier, T.; Gault, C.; Baumard, J.F. *Journal of the European Ceramic Society* 19 (1999) 1569-1574.