

Evaluación de Mezclas de Arcillas de la Región de Guanajuato

Rosalba Fuentes-Ramírez*, Omar Mejía Ordaz*, Ma. Guadalupe de la Rosa Álvarez*, Bartolo Caudillo*, Juan José Guzmán Andrade** y Yolanda Gallaga Ortega**.

RESUMEN

Se mezclaron varias arcilla del estado de Guanajuato y se determinaron sus propiedades con el objeto de identificar la mejor pasta cerámica. La mejor mezcla mostró una excelente plasticidad para el moldeo y una contracción lineal durante el secado de 4,61%. El proceso de secado fue analizado con la curva de Bigot a dos temperaturas (60°C y 80°C) y la cocción óptima de la pasta fue a 1 030°C. Después de ser cocidas, las piezas presentaron un 12,3 % de absorción de agua, 5,4% de contracción, 91 de dureza Rockwell B y 35 kg/cm² de resistencia a la compresión.

ABSTRACT

Different clays of the state of Guanajuato were mixed and their properties were analyzed in order to select the best ceramic paste. The best mixture showed an excellent plastic molding and a linear contraction of 4,61% during the drying process. This process was analyzed using the Bigot curve at two different temperatures (60 and 80°C). The optimal firing temperature was 1030°C. After the firing process, the pieces showed 12,3 % water absorption, 5,4 % contraction, a 91 HRB hardness and a compressive strength of 35 Kg/cm².

Recibido: 14 de Diciembre de 2007
Aceptado: 23 de Julio de 2008

INTRODUCCIÓN

En la industria cerámica es importante lograr la formulación óptima de las pastas cerámicas. Sin embargo, éste es un procedimiento complicado ya que la composición de las arcillas varía de acuerdo al tipo de yacimiento de donde se extraen. Por ello, es importante en cada industria de este ramo, mantener un estricto control de la formulación de la pasta con el fin de mejorar la calidad de los productos, minimizar los costos tanto de materia prima como de energía y disminuir los tiempos del proceso.

Una pasta cerámica de buena calidad debe poseer ciertas características, entre las cuales estarían: buenas propiedades de moldeabilidad en su estado plástico; secar sin cuartearse; adquirir una estructura sólida y densa sin contraerse después de la cocción y además la pieza terminada debe presentar el color deseado. Las características de las pastas dependen del tipo de arcilla. En el estado de Guanajuato, un trabajo que analiza sus tipos de arcillas, localización y cuantificación fue publicada por Ramos y col. (2002).

Para producir piezas cerámicas, son mezcladas una o varias arcillas incluyendo otros materiales, para ser secadas y, posteriormente, cocidas las piezas.

El proceso de secado tiene como objetivo eliminar el agua aplicada en la etapa de conformación, necesaria para el logro de una masa plástica. Todas las arcillas y pastas experimentan contracción al secar, debido a la eliminación de finas capas de agua presente entre las partículas. Van der Zanden (1997), Van der Zanden y col. (1996) y Su (1997) consideran que en el secado de las arcillas ocurre transporte de líquido y vapor. Dichos investigadores mostraron que la concentración de vapor es directamente proporcional a la porosidad. Durante el secado de los sólidos, la contracción está presente y ésta puede depender de las

Palabras clave:

Arcilla; Pasta cerámica; Secado; Cocción.

Keywords:

Clay; Ceramic paste; Drying; Firing.

* Facultad de Química de la Universidad de Guanajuato. Noria Alta s/n. CP 36050 Guanajuato, Gto, México. Tel. 01(473) 732 00 06 ext. 8139. correos electrónicos: rosalba@quijote.ugto.mx, iqomarmeja@hotmail.com, delarosa@quijote.ugto.mx y aaaa4142@quijote.ugto.mx.

** Centro de Investigaciones en Química Inorgánica de la Universidad de Guanajuato. Noria Alta s/n. CP 36050 Guanajuato, Gto, México. Correos electrónicos: andraj@quijote.ugto.mx y ciqui@quijote.ugto.mx.

condiciones en que se efectúe el secado, de la estructura del material y de la geometría de los productos.

Obtener un modelo matemático para el proceso de secado es muy complicado, ya que se deben considerar además de las propiedades del material, las condiciones del entorno relacionadas con el fenómeno. En este tipo de análisis hay diversos factores como coeficientes de contracción, difusividad de masa, contracción y densidad, sin embargo, no existe mucha información sobre ellos. En general se analiza la relación entre la retracción lineal y el contenido de humedad, aunque existen publicaciones (Itaya *et al.*, 1997; Itaya y Hasatani, 1996) que analizan la contracción volumétrica. Una alternativa práctica que analiza la evolución de la contracción lineal en el secado en función de la pérdida de agua es la Curva de Bigot, y la cual, se utilizó en este trabajo.

Las piezas secas se cocen presentándose reacciones en estado sólido incluyendo la rotura de enlaces químicos, la descomposición de minerales y la formación de puentes de unión; posteriormente se genera líquido ya que una parte de los componentes se funden. Todo ello conduce hacia una densificación de la masa y que al enfriar el material se adquiere una rigidez que le confiere las propiedades cerámicas características. Riccardi y col. (1999) presentan en su trabajo un análisis de estos eventos. Las reacciones presentes en la cocción han sido analizadas por Padoa (1990). Peng y col. (2007) reportan en su trabajo un análisis teórico de compactación y de la sinterización durante la cocción.

Durante la etapa de cocción de una pasta cerámica sigue presentándose contracción y porosidad, las cuales pueden evaluarse, de una manera práctica, trazando la curva absorción-contracción a diferentes temperaturas para conocer la óptima.

Las pruebas fisicoquímica efectuadas para caracterizar las pastas cerámicas tienen un valor más práctico e industrial y a través de la interpretación de los datos que se deduce su evaluación aproximada (Morales J., 2005).

En el presente trabajo se evaluaron las propiedades de varias formulaciones de pasta cerámica, las cuales fueron obtenidas al mezclar tres tipos de arcillas que se encuentran en el estado de Guanajuato. De las formulaciones obtenidas se seleccionó aquella que presentó buenas propiedades al moldeado, al secado y a la cocción. También se analizaron el secado y cocción. Los resultados de este trabajo aportarán información valiosa para la industria cerámica del estado, ya que se mostrará que es posible obtener una pasta cerá-

mica de alta calidad con los yacimientos naturales de arcillas de esta entidad.

METODOLOGÍA

Fueron utilizadas tres arcillas de las más representativas en el estado de Guanajuato, las cuales fueron nombradas de acuerdo al color característico que presentaban como: arcilla roja (AR), arcilla amarilla (AA) y arcilla negra (AN).

La metodología fue la siguiente:

1) Caracterización de las arcillas por DRX en un equipo Difractómetro de polvos Siemens D-500 con tubo de rayos-X, ánodo de cobre, operado a 30 kV y 20 mA y análisis de infrarrojo en un equipo Perkin Elmer serie 1600 FTIR con la técnica de reflectancia difusa.

2) Determinación de propiedades físicas de arcillas y mezclas de arcillas.

a) Las arcillas fueron molidas en un molino de porcelana con bolas de alúmina hasta pasar la malla Tylor 60 (partículas menores a 230 micras) y se realizó un análisis granumétrico.

b) Para cada una de las arcillas se determinaron los valores del porcentaje de agua de plasticidad, absorción de agua y porcentaje de contracción.

c) Se prepararon las mezclas de arcillas y fueron determinadas también las propiedades de plasticidad, absorción de agua y contracción. Para ello, los polvos se mezclaron y se moldearon en forma de piezas de dimensiones 2cm x 4cm x 15cm, usando la cantidad de agua que le dio a la pieza la plasticidad necesaria para manipularse. El agua utilizada para esto, depende de la composición mineralógica y del tamaño de las partículas.

3) Determinación de la zona de secado crítico para la mejor mezcla.

Esta prueba se efectuó una vez definida la mejor mezcla de arcillas y con los datos se elaboraron dos curvas de Bigot (porcentaje de contracción contra porcentaje de humedad), una a 60°C de temperatura y otra a 80°C. Cada pieza moldeada de 2 cm x 4 cm x 15 cm se pesó y se le marcó encima una longitud de referencia, luego se secaron en una estufa eléctrica y se registraron la longitud y peso de las piezas a intervalos regulares de tiempo, hasta que las piezas alcanzaron un peso constante.

4) Determinación de la temperatura óptima de cocción de la mejor mezcla.

Para esta prueba las piezas ya secas, fueron cocidas a diferentes temperaturas en una mufla eléctrica (marca Barnstead Internacional, modelo: FB1415M, termolyne). Las temperaturas ensayadas fueron las de los conos Pirométricos: 08 (945°C), 07 (975°C), 06 (1 005°C), 05 (1 030 °C) y 04 (1 050 °C). Se midió el tanto por ciento de absorción de agua y tanto por ciento de contracción lineal y los resultados se usaron para construir la curva de Gresificación, cuya interpretación permite conocer la temperatura óptima de cocción de la pasta cerámica. El porcentaje de absorción de agua se midió introduciendo las piezas cocidas en agua a ebullición por tres horas, se pesaron las piezas antes y después de este proceso. La contracción se midió utilizando la longitud entre las marcas que se hicieron a las piezas durante el secado. También fueron determinadas la dureza y resistencia a la compresión a las diferentes temperaturas de cocido.

5) Determinación de propiedades mecánicas de la mejor mezcla.

Las piezas cocidas se sometieron a pruebas de dureza y resistencia a la compresión. La dureza HRB (Dureza Rockwell B) de las piezas, se determina con un Durómetro, (marca Phase II, modelo PTH-2500) y la resistencia a la compresión se obtuvo a través de una prensa hidráulica (marca ERKCO, modelo PH-21). También se determinó la densidad y la porosidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1) Caracterización de las arcillas por DRX y FTIR.

Las arcillas resultaron materiales constituidos por varios tipos de materiales. En la figura 1 se muestran los difractogramas de las tres arcillas utilizadas como materia prima en los ensayos.

En el difractograma A) AA, correspondiente a la arcilla amarilla, se observó la presencia de caolinita (material fino que aporta plasticidad), feldespato plagioclasa (material con propiedades de material fundente) y cuarzo, además de la probable presencia de montmorillonita y clorita, lo cual le confiere características de material arcilloso caolinítico.

En el difractograma de la muestra B) BN, se identificó la presencia de cuarzo, feldespato y hematita, además de la posible presencia de clorita y mica. Por su parte, en la muestra C) AR de arcilla roja, se determinó la presencia de feldespato ortoclasa, talco, cuarzo y hematita, con posible presencia de montmorillonita.

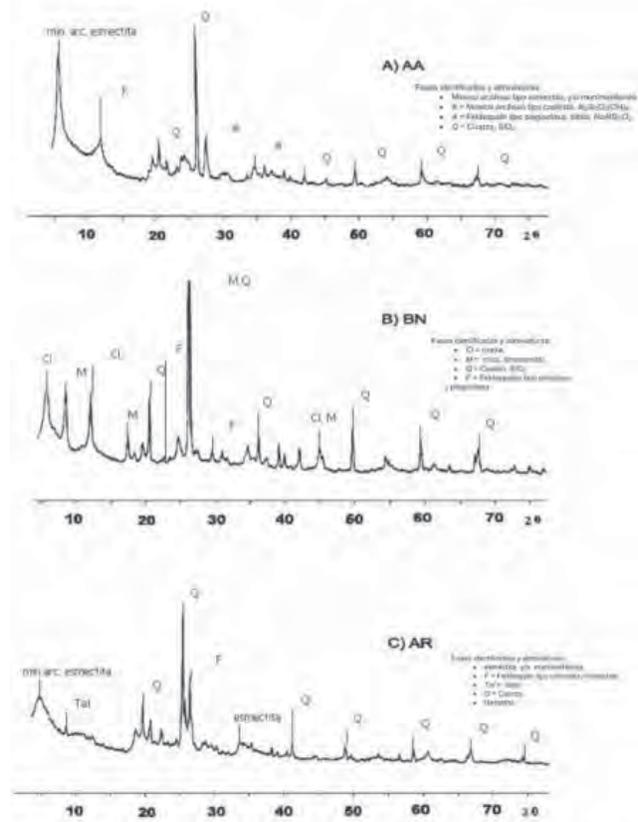


Figura 1. Difractogramas de RX de las arcillas AA (arcilla amarilla), BN (arcilla negra) y AR (arcilla roja).

El análisis de infrarrojo fue realizado en un equipo Perkin Elmer serie 1600 FTIR con la técnica de reflectancia difusa. En la figura 2 se presentan los espectros de infrarrojo para las materia prima denominadas: AA, AR y AN. De manera general, en las tres muestras se observaron dos zonas, correspondiendo la primera a la región de $3\ 300\text{ cm}^{-1}$ a $3\ 650\text{ cm}^{-1}$, con bandas asignadas a vibraciones de alargamiento de grupos O–H, presentes en caolinita, montmorillonita y clorita, siendo importante los picos pequeños próximos a $3\ 650\text{ cm}^{-1}$ en las tres muestras, correspondientes de manera particular a vibraciones de grupos SiO–H, presentes en los silicatos minerales en las estructuras de cuarzo y montmorillonita. La banda ubicada alrededor de los $1\ 600\text{ cm}^{-1}$, presente en las tres muestras, se relaciona con vibraciones de flexión de grupos HOH de los mismos minerales indicados antes. Las bandas con máximos ubicados aproximadamente a $1\ 000$ y 800 cm^{-1} , permite ubicar cualitativamente la presencia de minerales como cuarzo, montmorillonita y feldespatos, correspondiendo a vibraciones de tensión simétrica y asimétrica de grupos Si–O–Si, pero sin per-

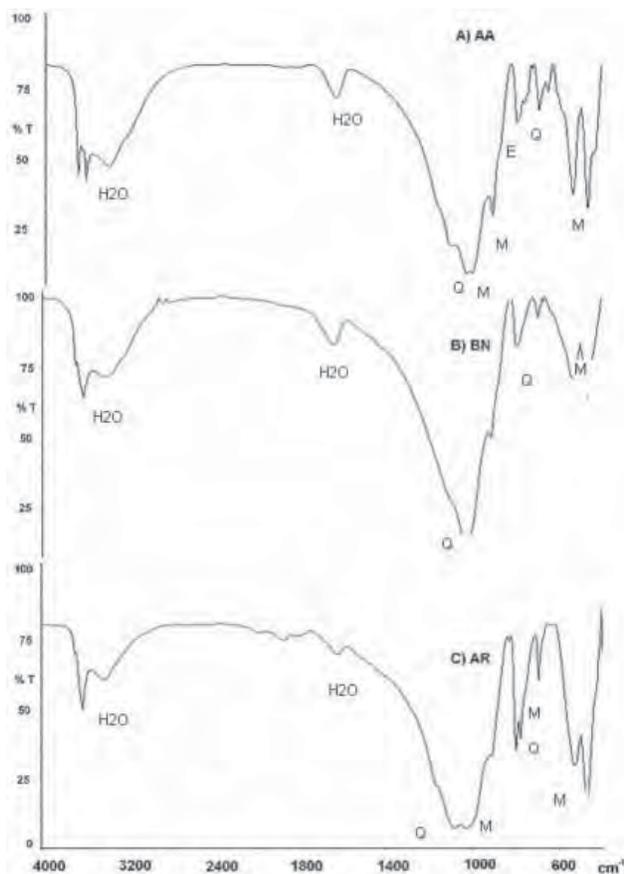


Figura 2. Espectros de IR de las arcillas AA, BN y AR.

mitir hacer diferenciaciones importantes. Esta misma idea prevalece para la serie de bandas entre 400 cm^{-1} y 700 cm^{-1} . De forma general, la información observada en los espectros de infrarrojo corresponde a la presencia de minerales silicoaluminatos hidratados, que asimismo, cualitativamente coincide con la información más específica observada en los difractogramas.

2) Determinación de propiedades físicas de las arcillas y de las mezclas.

Las arcillas fueron molidas, la tabla 1 presenta su análisis granulométrico usando mallas taylor.

Puede observarse que existe una gran proporción de material menor a la malla 200. Es común que entre más pequeño sea el tamaño más agua se requerirá para moldearse la pasta y así mismo, la pieza es más propensa a sufrir una mayor contracción durante el secado. Visto el análisis granulométrico y la proporción de tamaños existentes es de considerar que no se presentará una gran contracción de las piezas.

Tabla 1. Análisis granulométrico de las arcillas.

Muestra	Malla	Porcentaje en Peso
AMARILLA	100	32,2
	150	8,2
	200	9,1
ROJA	-200	50,5
	100	15,9
	150	8,8
	200	9,2
NEGRA	-200	66,1
	100	29,9
	150	11,8
	200	12,1

Tabla 2. Densidad y porosidad de las arcillas naturales.

Muestra	densidad	Porosidad
AMARILLA	2,413	15,6%
ROJA	2,374	22,0%
NEGRA	2,259	21,0%

Se midió la densidad y porosidad de cada una de las arcilla, mostrándose los datos en la tabla 2.

Los resultados de densidad y porosidad muestran que el material con mayor densidad presenta un menor grado de porosidad.

Se realizó también un análisis cuantitativo vía húmeda de los compuestos presentes en las arcillas. La AR contiene: 70,8% de SiO_2 , 15,4% de Al_2O_3 , 6,7% de Fe y 7,1% de otros compuestos. La AA contiene: 66,2% de SiO_2 , 17,2% de Al_2O_3 , 4,9% de Fe y 11,7% de otros. La AN contiene: 62% de SiO_2 , 14,4% de Al_2O_3 , 7,2 % de Fe y 16,4% de otros compuestos.

Para determinar la mejor combinación de las arcillas en la mezcla, se analizó el comportamiento de cada arcilla, efectuándoseles pruebas de tanto por ciento de agua de plasticidad, contracción, absorción de agua y resistencia a la compresión. En la figura 3 se observa la caracterización de las arcillas utilizadas. Las arcillas amarilla y roja tienen características semejantes en contracción, absorción y plasticidad, en cuanto a la resistencia a la compresión, la arcilla roja muestra un mejor desempeño. La arcilla negra absorbe más cantidad de agua en comparación con las otras arcillas, lo cual, la hace mas plástica pero también presenta mayor contracción, además de que su resistencia a la compresión es menor a la de las otras arcillas.

Analizada la información de las propiedades de cada arcilla, para lograr una mejora en las propiedades

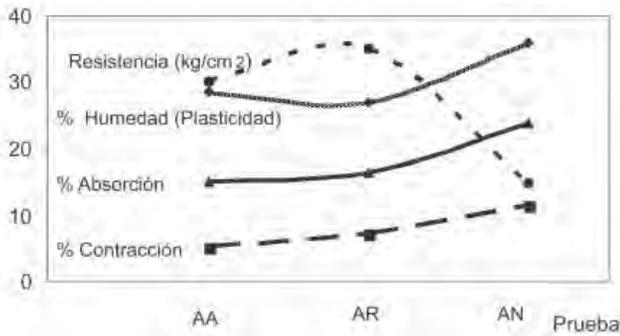


Figura 3. Propiedades de las arcillas utilizadas.

de la mezcla de ellas, se decidió usar diferentes proporciones de AN, 20%, 30% y 50%. Como se esperaba con el incremento de AN, mejoró la plasticidad pero se perdió la resistencia mecánica. Por ello, fijo la AN en 20% con objeto de mantener una buena moldeabilidad de la pieza, y se modificó la proporción de las otras arcillas para observar su efecto. Para complementar la mezcla, además de la AN se consideró la combinación de las proporciones de AR y AA entre un 50% y un 30% respectivamente, lo cual, constituyó el diseño de experimentos para formular las mezclas.

Observando las propiedades de las mezclas de las arcillas presentadas en la figura 4, se escogió como mejor la formulación de 50% AR, 30% AA y 20% de AN, la cual presentó la mayor resistencia mecánica manteniendo una buena plasticidad, baja contracción y absorción de agua.

Esta mezcla presentó un 25,12% de agua de plasticidad, 4,61% de contracción en seco, 7,16 % de contracción total después de la cocción, 6,57% de absorción de agua cocida la pieza y 35 kg/cm² de resistencia a la compresión. También se determinó que

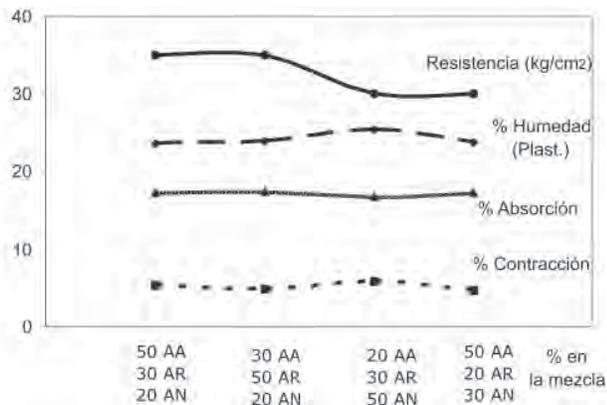


Figura 4. Comparación del comportamiento de varias mezclas de arcillas.

para esta mezcla la densidad es 2,234 g/cm³, con un 18,5% de porosidad.

3) Determinación de la zona de secado crítico para la mejor mezcla.

La cantidad de contracción es una característica muy importante en cualquier arcilla. En general, todas las arcillas y pastas encogen al secar. El control de este proceso evita que el secado sea desigual en la pieza y que haya diferencias en el modo de contracción que puedan originar que la pieza se fracture. El secado es un fenómeno de superficie en el que el agua de humedad emigra a la superficie para su evaporación. La curva de Bigot, muestra el secado crítico de la pieza y esta información puede posteriormente utilizarse en el diseño de secaderos.

La curva de Bigot representa la evolución del secado en función de la pérdida de humedad. A medida que la mezcla sea más plástica mayor será la contracción y mayor es el riesgo de que se produzcan tensiones que originen fisuras de secado. Construida la curva de Bigot, el cruce entre las prolongaciones de los tramos correspondientes a la primera y segunda etapa de secado corresponde a la llamada humedad crítica. Este punto depende únicamente de la pasta y debe determinarse en cada caso. Se obtuvieron las curvas de Bigot, para dos temperaturas de secado a 60°C (Figura 5) y a 80 °C (Figura 6).

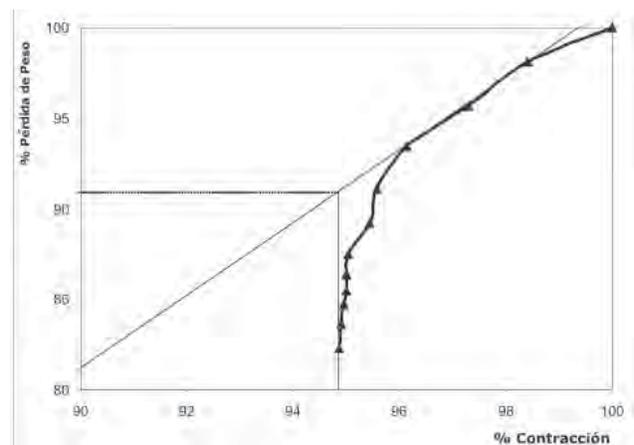


Figura 5. Curva de Bigot para pasta 50% AR, 30% AA y 20% de AN, para secado a 60°C.

En la curva de Bigot para el secado de la pasta a 60°C (Figura 5), se observa un efecto importante en el punto crítico de las coordenada (94,9; 91,1), donde el material ha perdido el 9% de su humedad, allí se enmarca la zona crítica de secado.

La Figura 6 es la gráfica de Bigot para la pasta secada a 80°C, en ella se observa el punto crítico en la coordenada (94,3; 90,1) localizado cuando el material ha perdido aproximadamente el 10 % de humedad. En dicha gráfica se determinó la zona crítica de secado. Puede observarse en la figura que a medida que el material pierde humedad, la pendiente decae rápidamente, lo que indica que en dicha zona el material puede sufrir fracturas considerables. Para evitar esto, es recomendable aumentar la humedad del material antes de llegar a la zona crítica, entonces se suavizaría la curva, disminuyendo la pendiente, y el material secaría sin llegar a fracturarse ya que la contracción del material sería controlada.

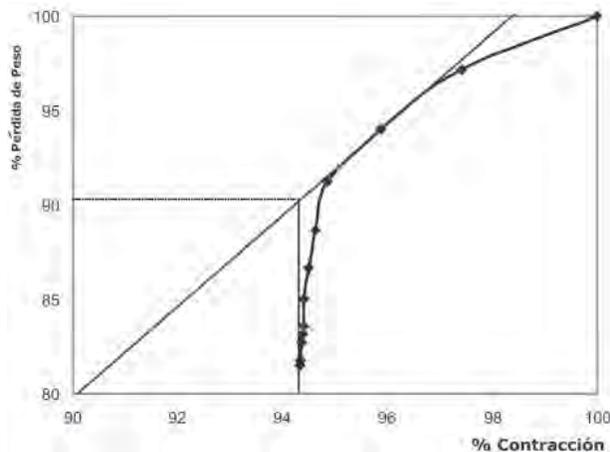


Figura 6. Curva de Bigot para pasta 50% AR, 30% AA y 20% de AN, para secado a 80°C.

Del análisis simultáneo de estas dos figuras, se observó que la zona crítica para la curva de secado a 80°C es menor que para la curva a 60°C. De esta manera puede recomendarse un secado a 80°C para la mezcla ya que a esta temperatura no se producen cambios tan bruscos ni en el secado ni en la contracción. A 80°C, el secado fue más suave. Cabe mencionar que, pasado la zona crítica, se puede recomendar un secado más rápido ya que la contracción prácticamente se mantiene constante a partir de ese momento.

4) Determinación de la temperatura óptima de cocción para la mejor mezcla.

En cerámica se puede considerar, que el agua física corresponde a la humedad que agregamos a la pasta, y que se evaporará o será eliminada mediante el secado. Por otro lado, las arcillas suelen tener agua químicamente combinada y que se elimina de las piezas a temperaturas mayores a 450° C del ciclo de horneado.

Las piezas secadas se cocieron a diferentes temperaturas y se les determinó el porcentaje de absorción de agua y la contracción lineal en cada temperatura utilizada para cocción. Se grafican los datos, en la figura 7, de absorción de agua y contracción total que tiene cada pieza a diferentes temperaturas y con esta información se determinó la temperatura de cocción de la mezcla de 50% AR, 30% AA y 20% de AN. En esta figura 7 puede observarse que dicha mezcla tiene a 1 030 °C la contracción más aceptable manteniendo una buena absorción necesaria para lograr una adecuada aplicación del esmalte. A esa temperatura se tiene de absorción de agua 12,3 % y de contracción total 5,4 %. En la figura 7 puede observarse un cambio en la pendiente a la temperatura seleccionada, sin embargo, puede notarse que se sigue la tendencia a eliminarse tanto la contracción como la absorción, lo cual no es el fin cuando se pretende utilizar la pasta para aplicar el esmalte, ya que para tener una buena adherencia de éste, debe existir adsorción.

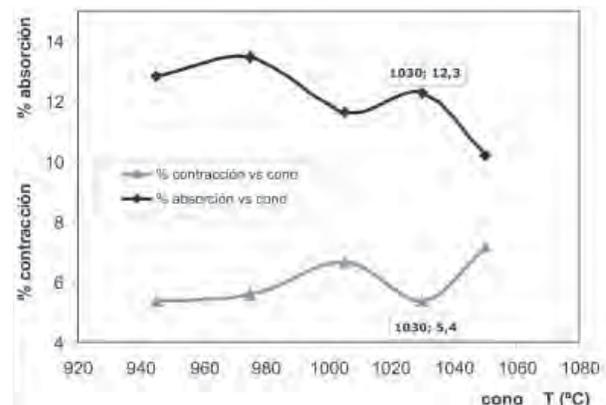


Figura 7. Curva de Gresificación para pasta 50% AR, 30% AA y 20% de AN que muestra la contracción y absorción en función de la temperatura.

5) Determinación de las propiedades mecánicas de la mejor mezcla.

A cada pieza cocida a distinta temperatura se le realizaron Pruebas Mecánicas: de dureza HRB (Dureza Rockwell B) y de resistencia a la compresión.

En el ensayo de dureza se mide la resistencia que opone un material a ser penetrado por otro material más duro. En la figura 8, se observa como la dureza aumenta al aumentar la temperatura, pero a partir de los 1 005 °C la pendiente es menos pronunciada, lo que indica que después de esa temperatura la dureza no presenta un incremento significativo.

El ensayo de resistencia a la compresión consiste en aplicar a la probeta, en la dirección de su eje longitudinal, una carga estática que tiende a provocar un

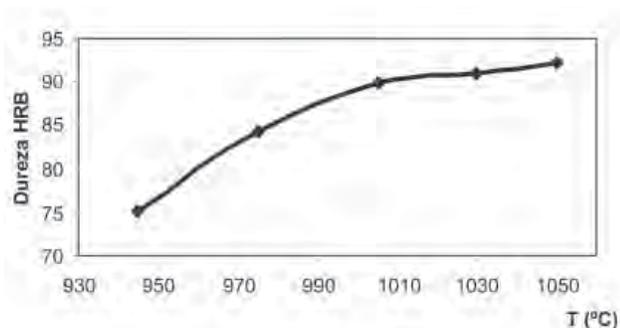


Figura 8. Dureza de la pasta seleccionada respecto a la temperatura de cocción.

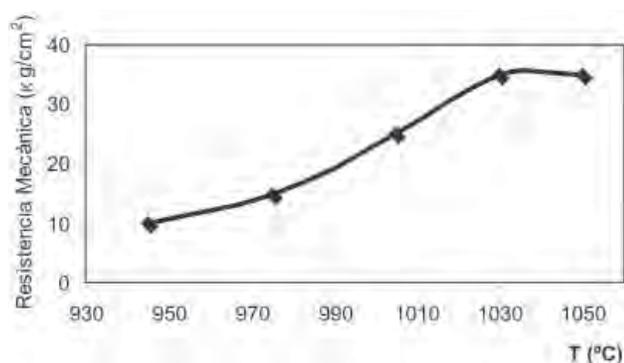


Figura 9. Resistencia a la compresión de la pasta en función de la temperatura.

acortamiento de la misma y cuyo valor se irá incrementando hasta la rotura o suspensión del ensayo. En la figura 9 se observa un aumento de la resistencia a la compresión del material al aumentar la temperatura. Se encontró que a una temperatura de cocción de 1030 °C, se observa la máxima resistencia mecánica a la compresión, la cual fue de 35 kg/cm². Tanto la prueba de dureza como la de resistencia fueron determinantes para elegir la temperatura óptima de cocción.

CONCLUSIONES

Las arcillas rojas y amarillas presentaron mejor resistencia a la compresión. La arcilla negra, con mayor contenido de hierro presentó plasticidad pero baja resistencia mecánica. La mezcla de estas tres arcillas ofrece buenas formulaciones de pasta cerámica. Su combinación eliminó problemas de cuarteado y ofreció una aceptable resistencia mecánica. Estas arcillas se encuentran dentro del estado y su uso disminuiría los costos de producción de diversas industrias del ramo cerámico en el estado.

La mejor mezcla fue 50% arcilla roja, 30% de arcilla amarilla y 20% de arcilla negra.

La curva de Bigot para esta mezcla a 80°C presentó una zona crítica de secado mejor que a la temperatura de 60°C, por lo que el secado debe hacerse a la primer temperatura.

Dadas las propiedades mecánicas al finalizar el cocido a distintas temperaturas, se pudo determinar que la temperatura de cocción óptima para la mejor mezcla es a 1 030 °C. A esta temperatura la pasta presentó una adsorción de agua de 12,3 %, una contracción total de 5,4%, alcanzó la mayor dureza (91 HRB) y la mayor resistencia a compresión del material (35 kg/cm²).

Finalmente, comprobamos que la evaluación de las propiedades como resistencia a la compresión, dureza, compresión y plasticidad de varias mezclas de arcilla, permite además de llevar un control de calidad, formular pastas cerámicas de una manera práctica.

AGRADECIMIENTO

A la M.C. Marina Vega del Centro de Geociencias, de la UNAM. Este trabajo fue realizado gracias al apoyo del CONCYTEG, bajo el convenio 07-16-K-662-055 A04.

REFERENCIAS

- Itaya, Y, Taniguchi, S y M. Hasatani, (1997). A Numerical Study of Transient Deformation and Stress Behavior of a Clay Slab during Drying. *Drying Technology* 15 (1), 1-21.
- Itaya, Y. y M. Hasatani, (1996). R & D Needs-drying Ceramics. *Drying Technology* 14 (6), 1301-1313.
- Morales Güeto J., (2005). *Tecnología de los materiales cerámicos*, Ediciones Diaz de Santos,.
- Padoa L., (1990). *La cocción de productos cerámicos*. Ed. Omega, S. A.
- Peng Ch., Gap-Yong K. and Jun Ni, (2007). Investigations in the compaction and sintering of large ceramic parts. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 190, Issues 1-3. 243-250.
- Ramos Ramírez E., Guzmán Andrade J.J., Sandoval Juárez M.C. y Gallaga Ortega Y., (2002). Caracterización de Arcillas del Estado de Guanajuato y su Potencial Aplicación en Cerámica. *Acta Universitaria*, 12 (1), 23-30.
- Riccardi M. P., Messiga B., y Duminuco P., (1999) An approach to the dynamics of clay firing. *Applied Clay Science*, Volume 15, Issues 3-4, .
- Su S., (1997). Modeling of Multiphase Moisture Transfer and Induced Stress in Drying Clay Brick. *Applied Clay Science*, 12, 189-207.
- Van der Zanden, A.J.J, A.M.E. Schoenmakers y P. J. A. M. Kerhof, (1996). Isothermal Vapour and Liquid Transport Inside Clay during Drying. *Drying Technology* 14, n. 3-4, 647-676.
- Van der Zanden, A.J.J. (1997). *Mathematical Modeling and Numerical Techniques in Drying Technology*, Ed. Marcel Dekker, Inc., New York-USA.)