

## **VIDA ÚTIL Y MECANISMO DE DETERIORO DE LOS MOLDES DE YESO PARA COLADO DE PIEZAS SANITARIAS**

*GLADYS MORÍN<sup>1</sup>, XAVIER HUNG<sup>2</sup>, ARNALDO MILLÁN<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Química, Universidad Central de Venezuela. e-mail: gabrielamorin@hotmail.com

<sup>2</sup> Departamento de Ciencia de los Materiales, Universidad Simón Bolívar. e-mail: xavihung@gmail.com

<sup>3</sup> Departamento Materiales. IUT-RC Dr. Federico Rivero Palacio. e-mail: protocebian@hotmail.com

Recibido: julio 2013

Recibido en forma final revisado: mayo 2014

### **RESUMEN**

El yeso es un aglutinante hidráulico que se utiliza en la elaboración de moldes para el conformado de piezas cerámicas mediante colado. En este proceso, se aprovecha la trabajabilidad de la mezcla yeso/agua y la alta porosidad de los moldes fabricados. Sin embargo, frente a estas ventajas, surge la limitante de la baja resistencia mecánica de los cuerpos de yeso, la cual está directamente relacionada con la vida útil de los mismos. En este sentido, se ha evidenciado que la vida útil de los moldes utilizados para la colada depende del tipo y la calidad del yeso utilizado para su elaboración. Por esta razón, en este trabajo se estudiaron las posibles causas que producen esta baja resistencia, para lo cual se caracterizaron dos yesos, uno de procedencia nacional y otro importado, ambos empleados en la elaboración de moldes para el colado de piezas sanitarias, los cuales permiten campañas del orden de 80 y 120 coladas, respectivamente. Para alcanzar el objetivo planteado, se realizaron estudios de resistencia a la flexión en tres puntos, microscopía electrónica de barrido, entre otros, sobre probetas elaboradas con diferentes relaciones yeso/agua. Las probetas cuya relación fue 57/43 presentaron la mayor resistencia; obteniéndose 3,2 MPa para el yeso nacional y 4,0 MPa para el yeso importado. Por otra parte, las fractografías de las muestras permitieron confirmar la presencia de impurezas y una marcada porosidad producida por las burbujas de aire atrapado en las probetas fabricadas con el yeso nacional. A partir de estos resultados, se planteó una teoría sobre el mecanismo de deterioro de este tipo de molde, la cual permitiría explicar las razones de la corta vida útil de los mismos.

*Palabras Clave:* Yeso, Molde, Sanitarios, Colada, Resistencia Mecánica, Porosidad.

## **LIFESPAN AND MECHANISM OF DETERIORATION OF PLASTER MOLDS USED FOR SLIP CASTING OF SANITARY WARE**

### **ABSTRACT**

Gypsum plaster is a hydraulic binder used in the manufacturing of molds for slip casting. This process takes advantage of the workability of the mixing gypsum plaster/water and the high porosity of the molds manufactured. However, compared with these advantages, in most cases arises a constraint such as the low mechanical strength of the gypsum bodies, which is directly related to their own lifespan. It has been shown that the lifespan of the molds used for slip casting depends on the type or quality of the gypsum plaster. Therefore, in this paper we study the possible causes that produce this lifespan difference. Two brand plasters, one national and the other imported were selected for the manufacturing of molds for slip casting of sanitary ware, which allows campaigns on the order of 80 and 120 casts, respectively. To achieve the goal, we made studies of flexural strength (MOR), scanning electron microscopy (SEM), among others experiments, on samples built with different relationships plaster/water. The test samples whose ratio was 57/43 showed the highest resistance; being 3.2 MPa for national gypsum plaster and 4.0 MPa for imported gypsum plaster. Moreover, the observation of the fracture surfaces confirmed the presence of impurities and a strong porosity caused by air bubbles trapped in test samples made from national gypsum plaster. Based on these results, a theory was raised on the mechanism of deterioration of these plaster molds, which would explain the reason for their short duration.

*Keywords:* Gypsum, Mold, Sanitary Ware, Slip Casting, Mechanical Strength, Porosity.

## INTRODUCCIÓN

El yeso natural es un mineral de amplia utilidad que tiene importancia comercial, fundamentalmente, como fuente de obtención del yeso hemihidratado. Este hemihidrato es un aglomerante hidráulico que, al ser mezclado con agua, forma una masa uniforme y semifluida capaz de endurecerse por la reacción de hidratación del compuesto químico que lo forma. Este producto tiene múltiples aplicaciones que dependen del tipo de hemihidrato, siendo una de las más importantes en la industria de cerámica sanitaria, en la cual se utiliza para la fabricación de moldes porosos destinados al conformado de piezas cerámicas mediante la técnica de colado. En este proceso, una suspensión de arcillas y otros materiales silicoaluminosos, denominada comúnmente barbotina, es vaciada dentro de un molde poroso y por efecto de capilaridad se produce la formación de la pieza (Arzabe, 1993; Norton, 1975).

Es bien conocido que un molde elaborado con un yeso de alta calidad puede soportar campañas del orden de las 120 coladas; asimismo, debe presentar un módulo de rotura superior a 40 kgf/q y un índice de absorción cercano al 40% (Morín, 2004). Sin embargo, se ha observado que los moldes elaborados con un yeso de procedencia nacional presentan una baja resistencia mecánica y alcanzan una vida útil promedio del orden de 80 coladas, lo que conlleva a su frecuente reemplazo, generándose de esta forma pérdidas económicas y de tiempo efectivo de producción.

En principio, la resistencia de los cuerpos de yeso puede ser influenciada por diferentes factores, entre los cuales se pueden mencionar:

- Relación yeso/agua. Por lo general, la resistencia mecánica de los productos de yeso aumenta a medida de que se incrementa la relación yeso/agua. De esta manera, cuando se requiere que la resistencia sea máxima, la relación yeso/agua debe aumentarse tanto como sea posible sin ir en detrimento de la trabajabilidad de la mezcla y de la cantidad mínima de agua necesaria para que se completen las reacciones de hidratación (Peyton *et al.* 1964).

- Tiempo de agitación. Un incremento en el tiempo de agitación también aumenta la resistencia mecánica de los materiales de yeso. Sin embargo, esta relación es válida hasta cierto límite puesto que si la mezcla es sobrealagitada los cristales de dihidrato formados se rompen, interrumpiendo su crecimiento, lo cual disminuye el entramado cristalino y conduce a una menor resistencia (Phillips, 1973).

- Aire atrapado dentro de la mezcla. Este efecto es poco

considerado aunque afecta en gran medida la resistencia mecánica de los materiales de yeso. A medida de que aumenta la cantidad de aire incorporado y atrapado en la masa fraguada, disminuyen los valores de resistencia mecánica. Para reducir la cantidad de aire incorporado a la mezcla, ésta se debe agitar de forma moderada y agregar el yeso de forma espolvoreada al agua (Morín, 2004).

- Aditivos. La incorporación de aceleradores de fraguado, retardadores de fraguado, dispersantes, entre otros, pueden afectar significativamente la resistencia mecánica de los productos de yeso y su durabilidad al alterar las reacciones de hidratación del yeso hemihidratado y/o la trabajabilidad de la mezcla (Behal & Schelker, 2008; Phillips, 1973).

Por otra parte, en el caso de los materiales obtenidos a partir de polvos, también es importante correlacionar el procesamiento y las propiedades del material con sus características microestructurales (Aksay, 1984; Onoda & Hench, 1978). En este sentido, existe una gran similitud entre el procesamiento y preparación del yeso y sus mezclas para la obtención de moldes, con el proceso de obtención de cuerpos cerámicos por el proceso de colada en moldes porosos. En ambos casos, se parte de un polvo fino que debe ser disuelto en un medio acuoso. Luego, en la medida de que transcurre el proceso, se incrementa el límite de fluencia de la mezcla hasta que alcanza cierto grado de endurecimiento; que en el caso de la barbotina se produce por un mecanismo de separación sólido-líquido, mientras que en las mezclas de yeso ocurre por una reacción de hidratación.

A partir de los años 70 y, específicamente, después de los trabajos de Lange (1989) y Pask (1979) sobre el procesamiento coloidal y comportamiento de partículas finas, se conoce con certeza que las impurezas, así como cualquier agente extraño, pueden actuar como una heterogeneidad dentro de la estructura y afectar las propiedades finales de los cuerpos elaborados a partir de polvos finos. Aunque inicialmente estos autores establecieron este principio para el procesamiento y conformado de materiales cerámicos, el concepto puede ser aplicado a otros procesos en los cuales los materiales empleados se encuentren en forma de polvos finos, cuya tendencia a aglomerarse aumenta al disminuir el tamaño de partícula. Adicionalmente, es importante destacar que el polvo de yeso tiene la particularidad de ser empleado como desecante (Rivero, 1997), lo que implica un carácter higroscópico e incrementa su tendencia a formar aglomerados blandos que luego se consolidan.

Por las razones expuestas, en este trabajo se plantea estudiar las posibles causas que producen la disminución del tiempo

de vida útil de los moldes utilizados para la colada de cuerpos cerámicos en función del tipo de yeso utilizado para su fabricación.

## PARTE EXPERIMENTAL

Se caracterizaron dos yesos comerciales utilizados ampliamente para la fabricación de moldes en la industria de cerámica sanitaria, uno de procedencia nacional (YPTVII) y otro importado (YF), con el fin de evaluar su ordenamiento así como también sus propiedades químicas, físicas y mecánicas.

Inicialmente, se realizó el análisis químico del YPTVII y del YF según la norma ASTM C471M-01 (2003) y COVENIN 3640:2000 (2000). De esta manera, se determinaron las cantidades de agua libre, sílice y otros residuos insolubles, óxidos de hierro, aluminio, calcio y magnesio, carbonatos de calcio y de magnesio, trióxido de azufre, y cloruros presentes en cada muestra.

El análisis por la técnica de Difracción de Rayos X (DRX) de ambos materiales, fue realizada con un difractómetro marca Philips modelo PW-1840, el cual operó con un tubo de rayos X de Cu ( $K\alpha_{Cu}=1,5418\text{\AA}$ ) a un voltaje de 40 kV y una intensidad de 22,5 mA.

El estudio granulométrico de ambos tipos de yeso se realizó mediante tamizado y granulometría láser. Para la distribución granulométrica por tamizado se consideró lo establecido en la norma ASTM C59/C59M-00 (2003) y se emplearon las mallas 50, 80, 200 y 325, previamente lavadas con alcohol isopropílico al 70% de pureza y secadas en una estufa por 24 horas a 80°C. Por otra parte, la distribución granulométrica del material  $<200\mu\text{m}$  se determinó con un granulómetro láser marca Malvern modelo MasterSizer 2000, utilizando etanol al 98% de pureza como vehículo.

Adicionalmente, para el estudio de la forma y tamaño de los cristales de hemihidrato presentes tanto en el yeso YPTVII como en el yeso YF, se empleó la técnica de Microscopía Óptica (MO). Para ello, se dispersó cada muestra de yeso (sin hidratar) en etanol de 98% de pureza sobre un portaobjeto y, seguidamente, fueron observadas usando un microscopio óptico marca Nikon modelo AFX-DX, conectado a una cámara fotográfica marca Nikon modelo Labophot 2- Pol de 35 mm.

Para determinar la resistencia mecánica, se elaboraron probetas prismáticas de 2,5cm x 2,5cm x 15cm, con relaciones de yeso/agua 60/40, 57/43 y 54/46. Todas las probetas fueron preparadas en condiciones ambientales

y de agitación similares. Estas barras fueron secadas a temperatura ambiente hasta peso constante y se rectificaron sus caras con la finalidad de minimizar el efecto de las imperfecciones superficiales. Estas probetas fueron sometidas al ensayo de flexión a tres puntos en una prensa universal marca INSTRON modelo MTS810. Una vez obtenido el módulo de rotura, se determinó el índice de absorción mediante la inmersión de las barras en agua por 3 horas, considerando su peso antes y después de la inmersión.

Para determinar la densidad real ( $\delta$ ) del yeso, antes y después del fraguado, se utilizó el método del volumenómetro de vidrio. Por otra parte, la densidad aparente ( $\tau$ ) de los cuerpos de yeso se determinó a partir de la relación entre el peso de cada probeta en gramos y su volumen en centímetros cúbicos, mientras que la porosidad se determinó mediante una relación entre la densidad real de los polvos y la densidad aparente de los cuerpos de yeso.

La observación de las superficies de fractura, defectos presentes, así como la estructura de los cristales de dihidrato de las probetas preparadas, fue realizada usando un microscopio electrónico de barrido marca Philips modelo XL 30. Asimismo, se realizaron microanálisis químicos elementales de las impurezas mediante la técnica Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Espectroscopía por Energía Dispersiva de rayos X (EDS, por sus siglas en inglés).

Por otra parte, el estudio del deterioro de los moldes de yeso se realizó tomando estereografías de la superficie de un molde fabricado a partir del yeso nacional después de una campaña de 80 coladas. Igualmente, se estudió la superficie de un molde elaborado con YF después completar su tiempo de vida útil (120 coladas).

Finalmente, para complementar estos estudios, una porción de la superficie del molde fabricado a partir del yeso nacional luego de completar su tiempo de vida útil se observó y analizó mediante la técnica de MEB. Adicionalmente, se utilizó la técnica la Difracción de Rayos X (DRX) para analizar las impurezas presentes en las muestras de yeso YPTVII.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis químico

El análisis químico de los yesos YPTVII y YF, mostrado en la Tabla 1, revela que estos materiales presentan un 94,13% y 92,49% de sulfato de calcio hemihidratado

(CaSO<sub>4</sub>·½H<sub>2</sub>O), respectivamente.

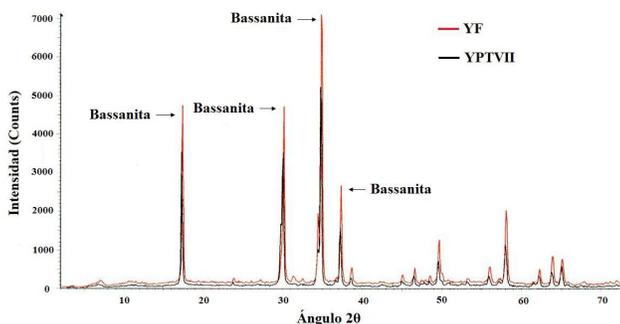
**Tabla 1.** Composición química de los yesos YPTVII y del YF

Compuestos	Fracción (%)	
	YPTVII	YF
Agua libre	1,29	1,29
CaSO <sub>4</sub> ·½H <sub>2</sub> O	94,13	92,49
CaSO <sub>4</sub>	0,00	0,00
SiO <sub>2</sub> y residuos insolubles	1,63	1,04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,47	0,70
CaCO <sub>3</sub>	1,74	3,95
MgCO <sub>3</sub>	0,30	0,45
NaCl	0,24	0,12

Por otra parte, tanto el yeso YPTVII como el yeso YF presentan 1,29% de agua libre y el resto está formado por impurezas. Estas impurezas pudieron incorporarse durante el tratamiento de la materia prima o provenir directamente de la piedra de yeso natural, puesto que en los lugares donde este mineral se deposita también hay presencia de calizas, areniscas, arcillas, pizarras y otras formas de depósitos salinos (Padrón, 2001; Peyton *et al.* 1964). Además, no se evidencia la presencia de sulfato de calcio anhidro (CaSO<sub>4</sub>), lo cual es un indicativo de que la materia prima no fue sometida a procesos de sobrecalentamiento (Hung, 2008; Morín, 2004). Mientras que la presencia de agua libre o no combinada puede deberse a la humedad absorbida por el polvo durante los procesos de traslado y almacenamiento.

### Análisis por Difracción de Rayos X

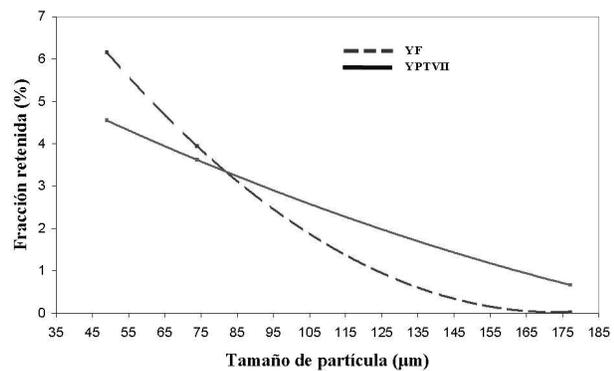
Los difractogramas del YPTVII y del YF mostrados en la Figura 1, permiten corroborar la presencia del sulfato de calcio hemihidratado o bassanita en ambos tipos de yeso.



**Figura 1.** Patrón de difracción de las fases presentes en los yesos YPTVII y YF

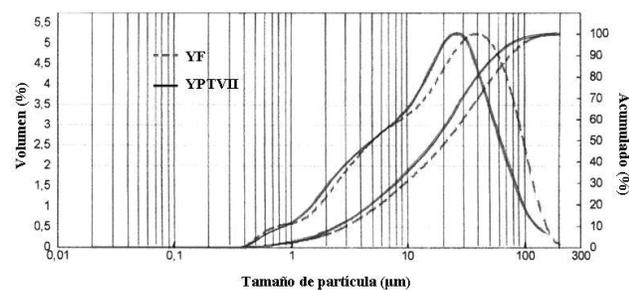
### Granulometría

Según la Figura 2, la fracción gruesa del YPTVII presenta una mayor cantidad de material retenido en la malla 80 (177µm) que el YF. Además, se pudo evidenciar que el retenido estaba conformado por aglomerados rígidos y cuerpos duros de color crema y aspecto arenoso. Mientras que el retenido en la malla 200 (74µm), resultó similar para ambos yesos, en contraste el porcentaje retenido de YF en la malla 325 (44µm) fue superior al encontrado para la muestra de yeso YPTVII.



**Figura 2.** Distribución granulométrica de la fracción gruesa de los yesos YPTVII y YF

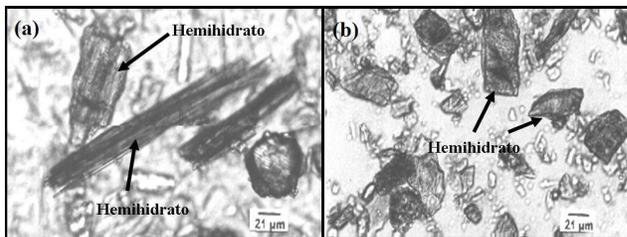
En cuanto a la fracción fina de ambos yesos, como se muestra en la Figura 3, el tamaño de partícula predominante para el YF es 40µm y 25µm para el YPTVII. Estos resultados pueden corroborarse al observar la Figura 4, en la cual se aprecia que el tamaño de los granos de hemihidrato que constituyen el YF es mayor que los presentes en el YPTVII y, adicionalmente, presentan una mayor planeidad.



**Figura 3.** Distribución granulométrica de la fracción fina de los yesos YPTVII y YF

De acuerdo con Sanz (2009), la longitud y forma de los granos de hemihidrato pueden originar cambios en el comportamiento mecánico de los materiales fraguados. En principio, los cristalitas de hemihidrato más grandes tienden a formar durante su hidratación una menor cantidad de núcleos de mayor tamaño, afectando la textura final y el

hábito de los cristales de dihidrato; asimismo, la existencia de caras paralelas puede facilitar el acercamiento de cristales de hemihidrato, lo cual según Chappuis (1999) puede mejorar la interpenetración de los cristales del entramado, dando lugar a un sólido con mayores resistencias.



**Figura 4.** Fotomicrografías del polvo tomadas con MO: (a) Yeso YF (sin hidratar) y (b) Yeso YPTVII (sin hidratar)

Por otra parte, como se evidenciará más adelante, es posible que la mayor finura del polvo de yeso YPTVII también esté relacionada con la tendencia a aglomerarse que presenta este material. De acuerdo con Lange (1989) y Pask (1979), durante el procesamiento coloidal, tanto en suspensiones como en mezclas, las partículas coloidales tienden a aglomerarse espontáneamente, producto de las fuerzas atractivas de tipo Van der Waals, principalmente. Esta condición afecta directamente las propiedades finales de las masas fraguadas, puesto que a medida de que cada aglomerado va incorporándose a la mezcla, se produce la humectación superficial del mismo y la formación de una capa densa a su alrededor que dificulta la difusión del agua hacia su núcleo. Además, los aglomerados están formados por diferentes partículas entre las cuales hay presencia de aire. Debido a la cinética de hidratación y la dinámica del proceso de mezcla, se produce un aumento progresivo de la viscosidad de la mezcla. De esta manera, el aire contenido dentro de estos aglomerados puede quedar retenido en forma de burbujas que se distribuyen en toda la masa del cuerpo fraguado, puesto que no tienen la fuerza de empuje suficiente para alcanzar la superficie (Morín, 2004).

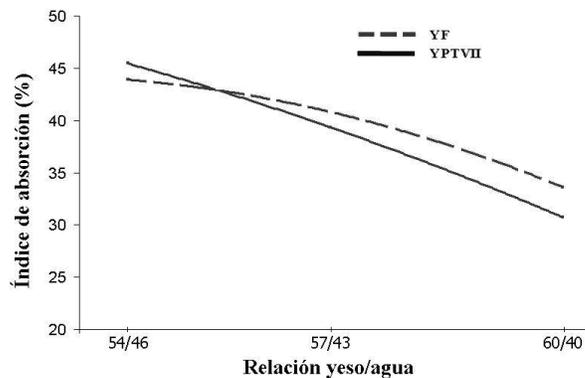
### Densidad, porosidad e índice de absorción

Los valores de densidad real obtenidos para las muestras de YPTVII y YF se presentan en la Tabla 2. Como se puede observar, se encuentran en el orden de los valores reportados en la bibliografía para el hemihidrato  $\beta$  (2,619-2,637g/cm<sup>3</sup>) (Singh & Middendorf, 2007).

**Tabla 2.** Valores de densidad real de los yesos YPTVII y YF

Tipo de yeso	Densidad real (g/cm <sup>3</sup> )
YPTVII	2,57
YF	2,63

Sin embargo, la densidad real del YPTVII resultó ligeramente inferior a la del YF. La razón de esta variación puede deberse, fundamentalmente, a la presencia de impurezas presentes en el yeso.



**Figura 5.** Representación gráfica del índice de absorción de las probetas elaboradas con relaciones de yeso/agua 54/46, 57/43 y 60/40

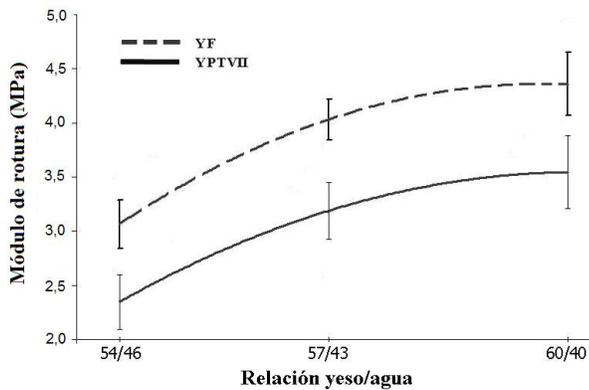
El comportamiento del índice de absorción según la relación yeso/agua de las mezclas analizadas, se puede observar en la Figura 5. Las probetas preparadas con una relación yeso/agua 57/43, que es la relación más empleada a nivel industrial, presentaron valores de 40,8% y 39,4% para el YF y el YPTVII, respectivamente, los cuales son valores aceptables para un molde. Además, los valores de densidad aparente y porosidad para la misma relación, mostrados en la Tabla 3, son similares para los cuerpos fraguados de ambos tipos de yeso.

**Tabla 3.** Valores de densidad aparente y porosidad de las masas fraguadas de los yesos YPTVII y YF. Relación yeso/agua: 57/43

Tipo de yeso	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad (%)
YPTVII	0,995	61,6
YF	0,987	62,2

### Resistencia mecánica y vida útil de los moldes

Para las tres mezclas con diferentes relaciones yeso/agua (60/40, 57/43 y 54/46), el yeso YF mostró una mayor resistencia. Sin embargo, como se puede observar en la Figura 6, la resistencia mecánica de ambos materiales presentó un comportamiento homotético, observándose que el incremento de la resistencia para mezclas con valores superiores a la relación 57/43 no es significativo. Probablemente, esto se deba a que el elevado contenido de sólidos incrementa la viscosidad de la mezcla, impidiendo una adecuada desaireación.

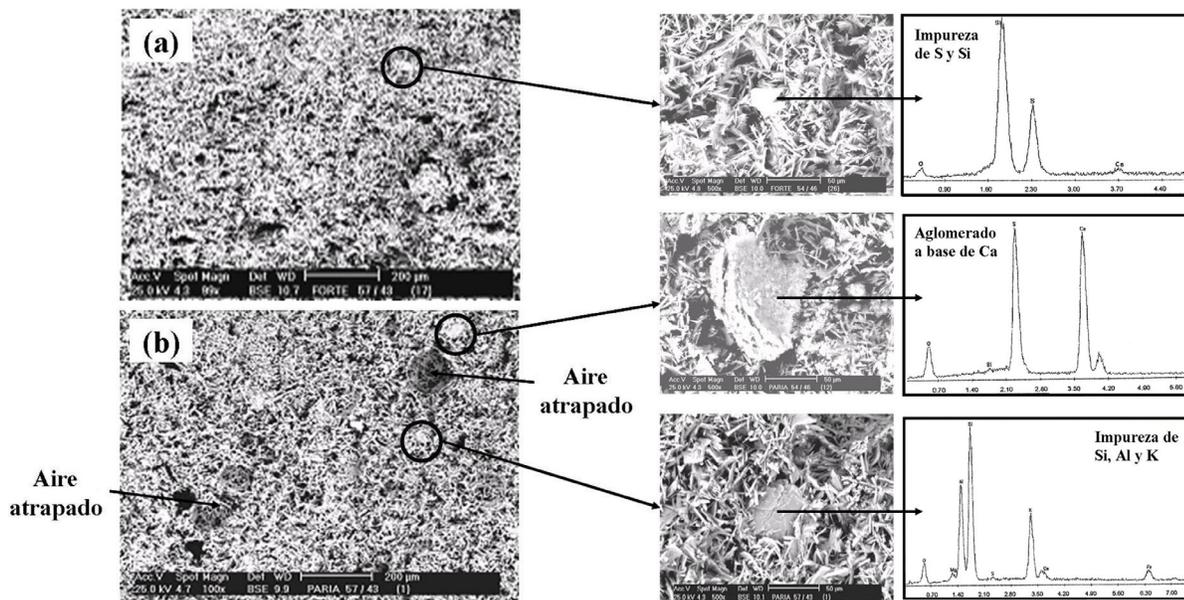


**Figura 6.** Representación gráfica del módulo de rotura de las probetas fabricadas con relaciones de yeso/agua 54/46, 57/43 y 60/40

Las probetas cuya relación fue 57/43 presentaron una resistencia de 3,2 MPa para el YPTVII y 4,0 MPa para el YF. En este sentido, las barras elaboradas con YPTVII presentaron una resistencia a la flexión entre 20 y 30% inferior que las del YF. Los valores reportados en la bibliografía para la resistencia mecánica deben encontrarse entre 30 y 40 kgf/cm<sup>2</sup> (2,9 y 3,9 MPa), siendo la relación yeso/agua de 57/43 la que presentó valores en este intervalo con mejor homogeneidad estructural.

Mediante el estudio por MEB de las superficies de fractura de las probetas elaboradas con la relación yeso/agua de 57/43, se observaron cavidades esféricas que son evidencia de aire atrapado e impurezas que presentaron tamaños de 50 a 180µm en las masas fraguadas de YPTVII, mientras que en las probetas del YF se encontraron impurezas cuyos tamaños variaban de 25 a 75µm, como se puede observar en la Figura 7. Los análisis de EDS indican que las impurezas en el YPTVII están compuestas principalmente por silicio, aluminio y potasio. Igualmente, se evidencia la presencia de aglomerados en base de calcio. En cuanto al yeso YF, las impurezas están compuestas principalmente por azufre y silicio.

Haciendo extensivos los principios del procesamiento coloidal a las mezclas de yeso, las impurezas y la porosidad originada por el aire atrapado pueden ser los principales responsables de la menor resistencia mecánica del YPTVII, debido a que actúan como heterogeneidades que debilitan la estructura (Lange, 1989; Aksay, 1984; Onoda & Hench, 1978; Pask, 1979), tal como ocurre en el hormigón, en el cual a medida de que aumenta el tamaño de los defectos y de los poros se reduce su resistencia a la flexión (Easterling, 1997).



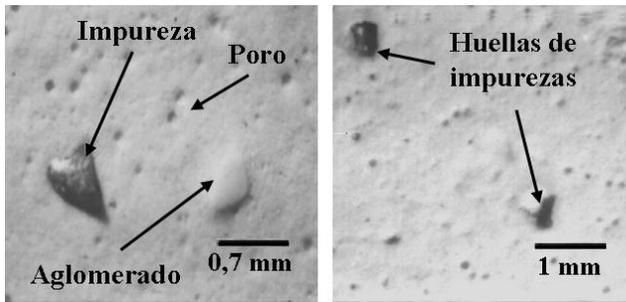
**Figura 7.** Fotomicrografías tomadas con MEB y análisis de EDS de las impurezas para las probetas elaboradas con una relación yeso/agua de 57/43: (a) yeso YF y (b) yeso YPTVII

Además de afectar la resistencia mecánica, las impurezas y el aire atrapado también pueden afectar directamente el tiempo de vida útil de los moldes de yeso utilizados para la colada de piezas sanitarias. Como se observa en la Figura 8, la presencia de impurezas y aglomerados contribuye al

deterioro superficial prematuro del molde. En este sentido, se pudo comprobar que el tiempo de vida útil de los moldes elaborados a partir de YPTVII no sólo está determinado por un cambio dimensional del molde producido por el desgaste químico y la acción abrasiva de la barbotina más allá de

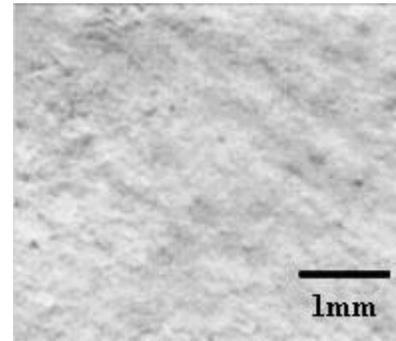
los límites tolerables, sino también por un aumento de los defectos en la superficie de las piezas coladas (Morín, 2004; Norton, 1975).

el cambio dimensional es el único factor que limita la vida útil de este molde, puesto que se produce un aumento del tamaño y peso de las piezas coladas (Morín, 2004; Norton, 1975).



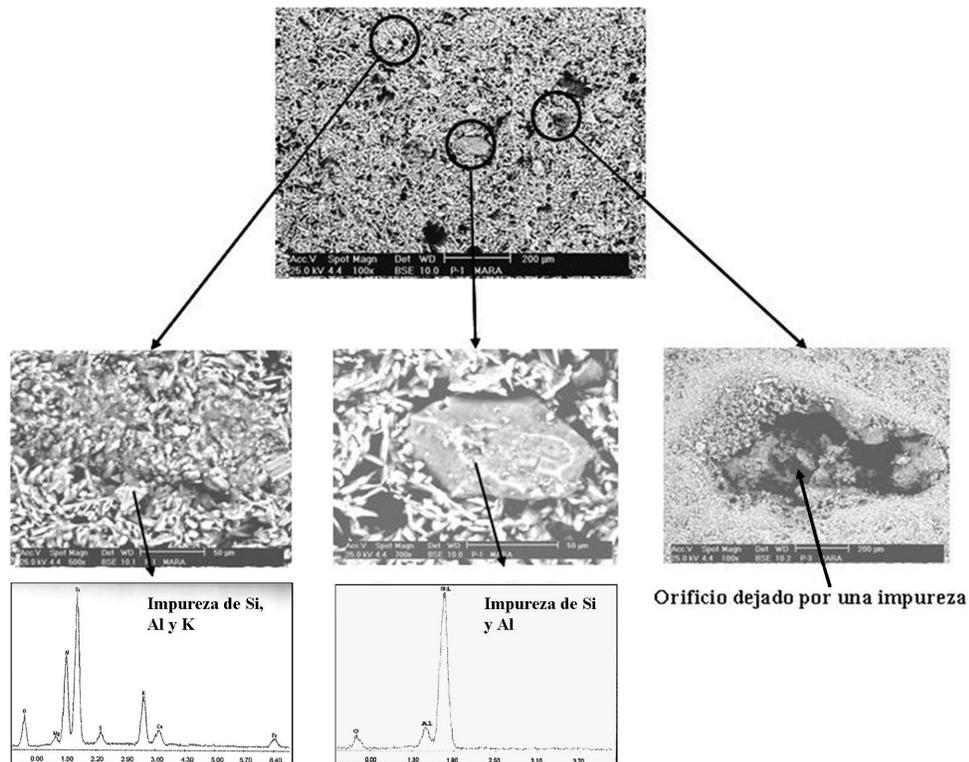
**Figura 8.** Aspecto de la superficie de un molde de yeso YPTVII al finalizar su vida útil de 80 coladas

De igual manera, en la Figura 9 se muestra la superficie de un molde fabricado a partir del YF al culminar su tiempo de vida útil de 120 coladas. En la imagen se puede observar que la superficie del YF al finalizar su campaña, es uniforme con poca presencia de defectos. En este caso,



**Figura 9.** Aspecto de la superficie de un molde de yeso YF al culminar su vida útil de 120 coladas

Adicionalmente, como se muestra en la Figura 10, mediante el estudio MEB-EDS de la superficie de un molde de YPTVII, elaborado con una relación yeso/agua de 57/43, al culminar su tiempo de vida útil de 80 coladas, revela la

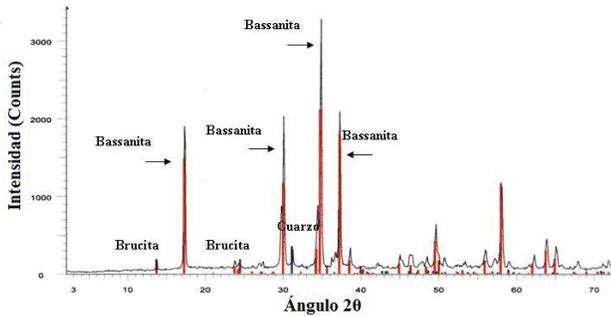


**Figura 10.** Fotomicrografías tomadas con MEB y análisis de EDS de las impurezas presentes en la superficie de un molde de yeso YPTVII, elaborado con una relación yeso/agua de 57/43, al culminar su tiempo de vida útil de 80 coladas

presencia de impurezas compuestas por silicio, aluminio y potasio, indicando que se trata de las mismas impurezas observadas en la superficie de fractura de las probetas sometidas a los ensayos de resistencia mecánica. Asimismo,

se evidencia la presencia de cavidades irregulares originadas, posiblemente, por el desprendimiento o fractura de las impurezas.

Los resultados del análisis por difracción de rayos X de las impurezas presentes en el YPTVII que se muestra en la Figura 11, revela la presencia de cuarzo y de un hidrato de magnesio conocido como brucita. En principio, la presencia de estas impurezas puede estar relacionada con una eliminación deficiente de impurezas en la materia prima durante su procesamiento y la formación de aglomerados a partir de partículas finas (Morín, 2004).

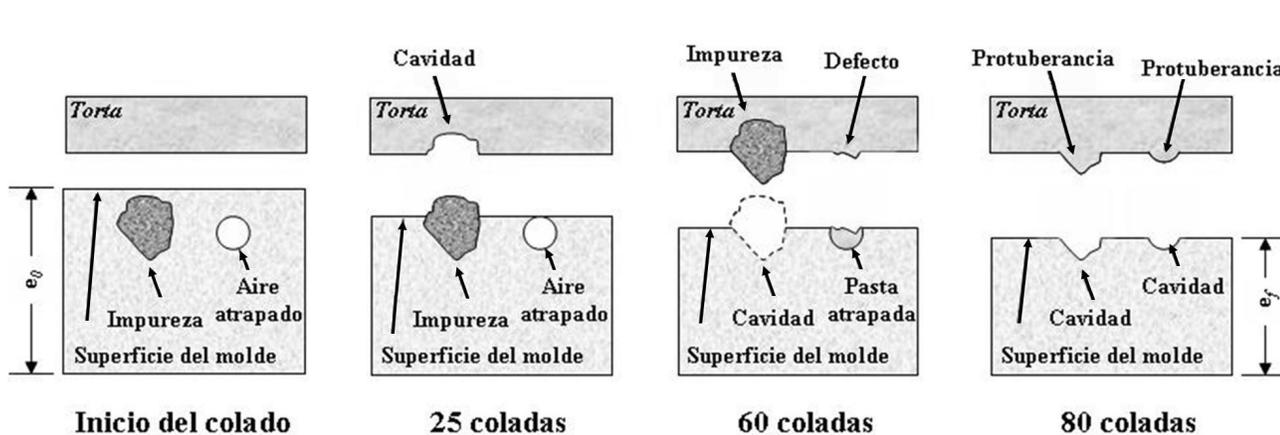


**Figura 11.** Patrón de difracción de rayos X de las impurezas presentes en el yeso YPTVII

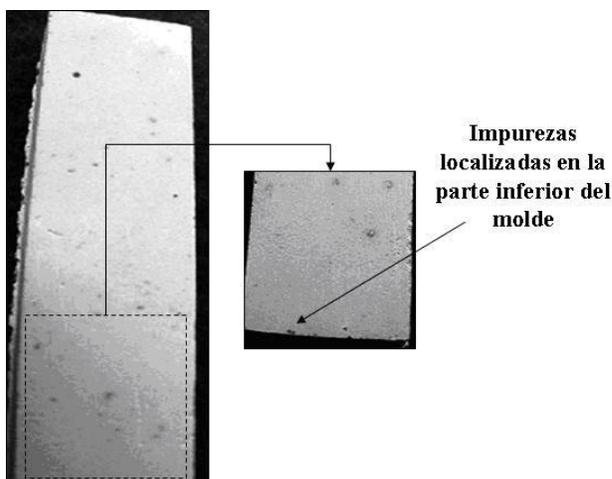
Sobre la base de los resultados obtenidos, se propone una teoría sobre el mecanismo de deterioro de los moldes fabricados a partir de YPTVII, la cual se ilustra en la Figura 12. Al inicio de la campaña de colado, los moldes presentan una superficie lisa, por lo que las piezas cerámicas no presentan defectos a nivel superficial; progresivamente, la superficie del molde se va deteriorando. Sin embargo, luego de alcanzar aproximadamente las 25 coladas, se observan impurezas que sobresalen de la superficie del molde. En este período, la superficie de la pieza cerámica comienza

a presentar defectos leves, como pequeñas cavidades, por lo que se hace necesario realizar un reacabado o remate superficial minucioso. Cuando el molde alcanza una vida útil del orden de las 60 coladas, estos defectos son más pronunciados en las piezas cerámicas y el proceso de reacabado requiere de una mayor dedicación, mientras que el molde presenta problemas de absorción. Algunas impurezas se desprenden de la superficie del molde y se observan como incrustaciones o puntos duros en la superficie de la pieza colada. Igualmente, las cavidades en el molde, originadas por el aire atrapado y las impurezas desprendidas, también producen irregularidades en la superficie de la pieza colada. Aunado a esto, las propiedades de la pieza cerámica también empiezan a verse afectadas por el incremento progresivo de sus dimensiones. Una vez que el molde alcanza las 80 coladas o antes, las irregularidades en la superficie de la pieza no sólo son poros y depresiones, sino que también comienzan a aparecer relieves, debido a la penetración de la barbotina en las cavidades dejadas por las impurezas y el aire atrapado. Adicionalmente, las impurezas incrustadas y no eliminadas de las piezas generan nuevos defectos luego del esmaltado y de la sinterización (Morín, 2004; Norton, 1975).

La presencia de esta serie de inconvenientes, que están asociados directamente con el procesamiento y preparación del yeso y sus mezclas, son las razones para considerar que ha culminado la vida útil de los moldes de yeso YPTVII. Para verificar esta teoría, en la Figura 13, se muestra la ubicación de las impurezas en un molde de YPTVII.



**Figura 12.** Mecanismo de deterioro de la superficie de un molde de yeso YPTVII ( $e_0$  es el espesor inicial del molde y  $e_f$  es el espesor final del molde)



**Figura 13.** Ubicación de las impurezas en un molde de yeso YPTVII

Durante la preparación de la mezcla yeso/agua y su posterior vaciado dentro de la matriz, las partículas gruesas, formadas por impurezas y aglomerados, tienden a sedimentar y se ubican en la parte inferior del molde, que es la zona que se encuentra en contacto con la barbotina. De esta manera, esta superficie presentará un deterioro mayor a medida de que se incrementa el grado de utilización o campaña del molde, puesto que con el desgaste del mismo estas impurezas quedarán descubiertas y producirán los defectos mencionados anteriormente en la pieza cerámica.

## CONCLUSIONES

- La morfología y tamaño de los cristales de hemihidrato y dihidrato, el aire atrapado, y la existencia de impurezas en el yeso son las principales causas de la baja resistencia mecánica encontrada en los cuerpos fraguados elaborados con el yeso YPTVII.
- La teoría del procesamiento coloidal propuesta por Lange (1989) y Pask (1979), es aplicable y de gran utilidad para la preparación de mezclas de yeso/agua para la elaboración de moldes de colado; así como también para la evaluación de las causas de su deterioro.
- Se planteó una teoría sobre el mecanismo de deterioro de los moldes de yeso YPTVII, en la cual se sugiere que el tiempo de vida útil de los mismos no sólo está determinado por un cambio dimensional del molde, sino también por un aumento de los defectos en la superficie de las piezas coladas originados por la presencia de impurezas, aire atrapado y aglomerados dentro del molde que contribuyen con su deterioro superficial prematuro.
- La resistencia mecánica y el índice de absorción son

inversamente proporcionales y dependen de la cantidad de yeso en la mezcla.

- La presencia de cristales de hemihidrato de mayor tamaño y planeidad en el yeso YF puede mejorar las propiedades mecánicas de las piezas fraguadas.

## REFERENCIAS

- AKSAY, I. A. (1984). Microstructure Control through Colloidal Consolidation. Forming of Ceramics, Advances in Ceramics, Vol. 9. American Ceramic Society, 94-104.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2003). ASTM C59/C59M-00: Standard Specification for Gypsum Casting Plaster and Gypsum Molding Plaster. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2003). ASTM C 471M-01: Standard Test Methods for Chemical Analysis of Gypsum and Gypsum Products [Metric]. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01.
- ARZABE, J. (1993). Preparación y caracterización de materiales de yeso aditivados. Tesis de Pregrado. Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.
- BEHAL, L. & SCHELKER, D. (2008). Effects of Polyacrylate and Sodium Silicate Dispersant on Plaster Mold Characteristics. Ceramic Engineering and Science Proceedings, 17 (1), 23-29.
- CHAPPUIS, J. (1999). A new model for a better understanding of the cohesion of hardened hydraulic materials. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 156, 223-241.
- EASTERLING, K. (1997). Materiales del futuro (2da edición). Londres (Inglaterra): The Institute of Materials. 44-46.
- HUNG, X. (2008). Producción de yeso alfa a partir de materia prima nacional. Tesis de Pregrado. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
- LANGE, F. F. (1989). Powder Processing Science and Technology for Increased Reliability. J. Am. Ceram. Soc., 72 (1), 3-15.

- MORÍN, G. (2004). Estudio comparativo entre dos tipos de yeso utilizados para el conformado de piezas sanitarias. Tesis de Pregrado. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- NORMA COVENIN 3640:2000: Yeso. Construcción y moldeo. Análisis químico. FONDONORMA. (2000).
- NORTON, F. (1975). Cerámica Fina: Tecnología y Aplicaciones. Barcelona (España): Ediciones Omega, S. A. 110-116.
- ONODA, G. Y. & HENCH, L. L. (1978). Ceramic Processing before Firing. New York (EE. UU.): Wiley-Interscience. 471-478.
- PADRÓN, F. (2001). Informe técnico económico del yeso. Caracas (Venezuela): Ministerio de Energía y Minas. 2-16.
- PASK, A. J. (1979). Ceramic processing: A ceramic science. Am. Ceram. Soc. Bull., 58 (12), 1163-1166.
- PEYTON, F., ANTHONY, D., ASGAR, K., CHARBENEAU, G., CRAIG, R., MYERS, G. (1964). Materiales dentales restauradores (1era edición). Buenos Aires (Argentina): Editorial Mundi. 183-216.
- PHILLIPS, R. (1973). La ciencia de los materiales dentales. México: Editorial Interamericana. 193-217.
- RIVERO, L. (1997). Fabricación de productos de base yeso y sus aplicaciones industriales. Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio, 36 (6), 591-598.
- SANZ, D. (2009). Análisis del yeso empleado en revestimientos exteriores mediante técnicas geológicas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Madrid, España. Disponible en: [http://oa.upm.es/1711/1/DAVID\\_SANZ\\_ARAUZ.pdf](http://oa.upm.es/1711/1/DAVID_SANZ_ARAUZ.pdf)
- SINGH, N. & MIDDENDORF, B. (2007). Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 53 (1), 57-77.