

## **EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE FUNDICIÓN DE ARENA DE OLIVINO VENEZOLANA (Parte I)**

*RUTH BISBAL<sup>1</sup>, FRANKLIN GÓMEZ<sup>1</sup>, CARLO DI YORIO<sup>2</sup>, MARCIAL PÉREZ<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Caracas. Venezuela. E-mail: bisbalr@gmail.com

<sup>2</sup>Centro de Investigación y Desarrollo de la Metalurgia Extractiva (CIDEMEX). Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Universidad Central de Venezuela. Caracas. Venezuela.

Recibido: agosto 2015

Recibido en forma final revisado: julio 2015

### **RESUMEN**

Los moldes de arena que se utilizan para la obtención de piezas metálicas mediante el proceso de fundición deben poseer características y propiedades adecuadas, a fin de asegurar piezas con el menor número de defectos posible. En la industria de la fundición de metales, la arena de mayor uso a nivel mundial ha sido la arena de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), con la cual se han obtenido muy buenos resultados en la fabricación de moldes de arena. Sin embargo, con la finalidad de evaluar otros minerales refractarios que pudieran ser empleados como material sustituto o complementario para la preparación de arenas de moldeo, que satisfagan las exigencias de esta industria, se ha propuesto el uso de arena de olivino ( $[(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4]$ ) proveniente de depósitos ubicados en Venezuela. Con este propósito se ha proyectado un estudio detallado que incluye la realización de una serie de ensayos para evaluar este tipo de arena. Para la caracterización de la arena de olivino se realizaron análisis granulométricos, y análisis mediante las técnicas de Difracción de Rayos X (DRX), Análisis Termogravimétrico (ATG), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Espectroscopía de Rayos X por Dispersión de Energía (EDS). De igual modo, se realizaron una serie de ensayos para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de las arenas de moldeo. Se encontró que los granos de la arena analizada tienen morfología angular-subangular y superficie rugosa. La distribución granulométrica y las características morfológicas de los granos de la arena de olivino, así como las propiedades de las arenas de moldeo preparadas, cumplen con algunos requerimientos de la industria fundidora nacional.

*Palabras clave:* arena de olivino, molde de arena, propiedades, fundición, piezas fundidas

## **EVALUATION OF THE CHARACTERISTICS AND PROPERTIES OF FOUNDRY OF THE OLIVINE SAND, VENEZUELA (Part I)**

### **ABSTRACT**

Sand molds used for producing metal parts by the casting process should possess characteristics and suitable properties in order to ensure work pieces with as less defects as possible. In the industry of metal casting, the sand mostly used worldwide has been silica sand ( $\text{SiO}_2$ ). And this type of sand have been very successful in the manufacture of sand molds. However, in order to evaluate other refractory minerals that could be used as a substitute or supplemental materials for the preparation of molding sands, which meets the requirements of this industry, it has been proposed the use of olivine sand ( $[(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4]$ ) obtained from deposits located in Venezuela. For this purpose, a detailed study has been projected that includes conducting a series of tests to evaluate this type of sand. The characterization of the olivine sand was performed via granulometric analysis, X-Ray Diffraction (XRD), Thermogravimetric Analysis (TGA), Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDS). A series of tests was also conducted to determine the physical and mechanical properties of molding sand. It was found that the sand grains have angular-subangular morphology, and rough surface. The particle size distribution and morphological characteristics of grains of olivine sand, as well as the properties of molding sands prepared, meet some requirements of national foundry industry.

*Keywords:* olivine sand, sand mold, properties, foundry, casting

## INTRODUCCIÓN

El principio de obtención de piezas metálicas mediante el proceso de fundición ha sido desde sus inicios el mismo, lo que ha evolucionado es el tipo de moldeo que se emplea en el proceso de colada y las técnicas para obtener el metal en estado líquido (Gerin, 1972). Uno de los materiales más empleados para la obtención de piezas metálicas fundidas es la arena, la cual debe tener características apropiadas que le permitan ser utilizadas en la preparación de mezclas de moldeo para la fabricación de moldes de arena. Los moldes de arena deben también poseer características y propiedades adecuadas a fin de asegurar la obtención de piezas metálicas con el menor número de defectos posible (Sertucha & Suárez, 2005).

Entre las características más importantes que se exigen en la industria de la fundición y que permiten la selección de una arena apropiada para la elaboración de moldes se encuentran la composición química de la arena, la distribución granulométrica y la morfología de los granos, así como el número de fineza AFS. De igual modo, entre las propiedades más significativas de la arena de moldeo que se deben tener en consideración en el proceso de fabricación de moldes están el contenido de humedad, la permeabilidad y la resistencia a la compresión en verde (Dionicio *et al.*, 2004; Ayoola *et al.*, 2010). También la práctica operativa de control de calidad en una empresa fundidora toma en consideración otros ensayos tales como compactabilidad, densidad, determinación de pH, contenido de bentonita activa, dureza, y resistencia a la compresión en seco (Quintero, 2009). Todas estas propiedades de las arenas de moldeo se ven influenciadas con la variación de los contenidos de bentonita, utilizada como aglomerante, y de agua usados en los sistemas de preparación de arenas (Sertucha & Suárez, 2005).

Dionicio *et al.* (2004) encontraron que incrementos en los contenidos de bentonita y humedad influyen en importantes propiedades como la permeabilidad y la resistencia a la compresión en verde, hasta valores máximos en los cuales incrementos subsiguientes conducen a la disminución de estas propiedades. De igual manera, Noguez *et al.* (2005) determinaron que los cambios en la formulación de los contenidos de bentonita y de agua de las arenas de moldeo ejercen influencia en la capacidad de extracción de calor de los moldes y por consiguiente, afectan directamente las propiedades mecánicas de la pieza colada.

En diferentes partes del mundo (Dionicio *et al.*, 2004; Noguez *et al.*, 2005; Ademoh, 2008) existen yacimientos de minerales refractarios que pueden emplearse en la

formulación de arenas de moldeo; por ejemplo, Ademoh (2008) analizó la factibilidad del empleo de arena de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) proveniente del río Níger en Nigeria, como arena base para la preparación de moldes. Este investigador realizó ensayos fisicoquímicos y mecánicos a la arena de moldeo, y encontró que con la distribución granulométrica de la arena estudiada y un contenido de 2% de humedad, 2,5% de bentonita y 1% de caolinita, la arena puede utilizarse con limitaciones debido a su baja refractariedad para obtener moldes para fundición principalmente para piezas de aleaciones no ferrosas.

Asimismo, Ayoola *et al.* (2010) realizaron un estudio de arenas de sílice provenientes de un depósito de arena del río Osun en Oshogbo, Nigeria, con la finalidad de sustituir la importación de arena base para la industria fundidora de ese país. En su análisis encontraron que incrementos en el contenido de humedad influyen directamente en las propiedades mecánicas de la arena de moldeo. Igualmente hallaron, al comparar las propiedades del molde de arena especificadas en la literatura (Gerin, 1972), que la arena analizada puede usarse para obtener moldes para la colada de fundiciones blancas para maleabilizar y moldes para la colada de aleaciones de aluminio.

Además de la arena de sílice las arenas para fundición pueden estar compuestas de olivino. El mineral de olivino es un ortosilicato de magnesio-hierro  $[(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4]$ . Su composición química normalmente transita entre dos términos extremos: la forsterita ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) y la fayalita ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ), dando lugar a una solución sólida entre ambos. El olivino es un mineral de composición química variable; en consecuencia, sus propiedades físicas varían con su composición química. Por lo tanto, la composición del olivino utilizado debe especificarse para controlar la reproducibilidad de la mezcla de arena (ASM Handbook, 2002). Existen depósitos de mineral de olivino en diversos países del mundo, y algunos destinan parte de la producción de olivino para usos en fundición. Entre los principales países productores de olivino que utilizan arena de olivino para fundición se encuentran Noruega, Japón, China, Estados Unidos, Italia y Turquía. El olivino tiene características y propiedades que lo hacen adecuado para usos metalúrgicos, entre las que se incluyen su bajo coeficiente de dilatación térmica, buena resistencia al choque térmico y al ataque de escorias, y alta resistencia en verde. Las propiedades refractarias más su bajo contenido de sílice y alta resistencia al ataque de metal hacen que el olivino pueda reemplazar a la arena de sílice como arena de moldeo para fundición, y de este modo ser usado en moldes para la colada de aluminio, latón, bronce, aceros al manganeso, fundición gris y aceros aleados. La arena

de olivino produce en las piezas coladas una superficie limpia que requiere un acabado mínimo. Otros beneficios adicionales incluyen la basicidad del olivino, lo cual mejora las propiedades aglomerantes de la bentonita, reduciendo así la demanda de esta arcilla (Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2006; Ilarduya y Cía., 2011).

En el presente trabajo de investigación se realizó un estudio detallado para analizar las características de arena de olivino ( $[(Mg,Fe)_2SiO_4]$ ) procedente de un yacimiento ubicado en Tinaquillo, Estado Cojedes, Venezuela, y evaluar la factibilidad de ser empleada en la fabricación de moldes de arena para la industria de la fundición. En este estudio se llevó a cabo la caracterización de la arena de olivino empleando las técnicas de Espectroscopía de Absorción Atómica de Llama (AA), Difracción de Rayos X (DRX), Análisis Termogravimétrico (ATG), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Espectroscopía de Rayos X por Dispersión de Energía (EDS). Del mismo modo, para el estudio de esta arena también se realizaron análisis granulométricos, análisis de la morfología de los granos y determinación del número de fineza AFS. En las arenas de moldeo preparadas se realizó la determinación de carbono utilizando el Método de Combustión Directa y Detección Infrarroja (Gasometría). También se analizó la influencia de diferentes contenidos de bentonita y de agua utilizados en el proceso de preparación de las arenas de moldeo, evaluando el efecto de la formulación de la arena en las propiedades físicas y mecánicas, por medio de ensayos normalizados.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### Preparación de la arena de olivino y ensayos de tamizaje

La arena empleada en este estudio es arena de olivino procedente de un yacimiento ubicado en el área de Cerrito Blanco a unos 10 Km al oeste de la ciudad de Tinaquillo en el Estado Cojedes, Venezuela. Esta arena debió acondicionarse previamente para luego realizar los ensayos de tamizaje a fin de obtener la distribución de tamaños de granos y el número de fineza AFS. Para asegurar la distribución y tamaños de los granos necesarios para que la arena de olivino pueda emplearse como arena base en la mezcla de arena de moldeo, la arena proveniente del yacimiento fue tamizada por un tiempo de 25 minutos. Una vez separada la arena, se procedió a mezclarla de acuerdo a una distribución específica a fin de obtener diferentes números AFS, ya establecidos, en los siguientes intervalos de fineza: 40-50, 50-70, 70-100. Luego de mezclada la arena en la proporción adecuada se realizó el procedimiento de cuarteo de toda la arena por cada condición de fineza. De cada intervalo de fineza establecido se colocaron

50 +/- 5 gramos de esta arena en el tamiz superior de la serie de tamices AFS (tabla 1) de un equipo separador de tamaños (Separador de laboratorio, marca +GF+, modelo SPSR) y se realizaron los ensayos de tamizaje durante 15 minutos, de acuerdo al procedimiento establecido en el manual de ensayos de la AFS (American Foundry Society, 2001). Posteriormente, se procedió a realizar el análisis granulométrico y la determinación de los números de fineza AFS de las porciones de arena seleccionadas para realizar este estudio.

### Análisis granulométrico y determinación del número de fineza afs

Después del tamizaje, se realizó el análisis granulométrico de las muestras de arena de olivino preparadas de acuerdo a los intervalos de fineza previamente establecidos, lo cual permitió obtener la curva de Peso retenido (%) *versus* Número de tamiz, y calcular los números de fineza AFS mediante la siguiente fórmula:  $AFS = \sum (\%Pri \times a) / \sum \%Pri$ , donde  $\%Pri$  representa el porcentaje de arena retenida en cada tamiz y  $a$  es una constante que depende de cada tamiz de la serie; esta constante se conoce como factor multiplicador (Heine *et al.*, 1967; Foseco Ferrous Foundryman's Handbook, 2000).

### Caracterización química de la arena de olivino

Se realizó el análisis químico de la arena de olivino mediante la técnica de Espectroscopía de Absorción Atómica de Llama (AA) (Espectrofotómetro de absorción atómica, marca Perkin-Elmer, modelo AAnalyst 300) para determinar los contenidos de Si, Mg, Fe, Ca y Al presentes en esta arena y luego, con la relación de pesos moleculares, se determinó la composición química de los principales óxidos de la muestra de arena bajo estudio. Mediante la técnica de Difracción de Rayos X, DRX, (Difractómetro de rayos X, marca Philips, modelo PW-1840) se identificaron las fases presentes en la muestra de arena de olivino. Para obtener información acerca de la pérdida de masa en función de la temperatura de la arena de olivino se utilizó la técnica de Análisis Termogravimétrico, ATG, (Analizador térmico, marca Shimadzu, modelo DTG-60).

### Caracterización morfológica de la arena de olivino

Para observar las características morfológicas y superficiales de los granos de la arena de olivino tamizada se emplearon las técnicas de Microscopía Óptica, MO, (Microscopio binocular, marca Leitz Wetzlar, aumento: 10 X) y de Microscopía Electrónica de Barrido, MEB, (Microscopio electrónico de barrido, marca Hitachi, modelo S-2400).

Se utilizó la técnica de Espectroscopía de Rayos X por Dispersión de Energía, EDS, (Sistema de microanálisis EDS, marca Thermo, modelo 4431B-1NUS-SN, el cual

está acoplado al microscopio electrónico de barrido) para realizar el microanálisis químico a la muestra de arena sometida a estudio.

**Tabla 1.** Serie de tamices AFS (Heine *et al.*, 1967) empleados en los ensayos de tamizaje de la arena de olivino

Número de tamiz	12	20	30	40	50	70	100	140	200	270
Apertura de malla (mm)	1,680	0,841	0,595	0,420	0,297	0,210	0,149	0,105	0,074	0,053

### Preparación de las arenas de moldeo a base de arena de olivino

Para evaluar las propiedades de las arenas de moldeo preparadas con arena de olivino y con aditivos (bentonita, agua y polvo de carbón) y la influencia de aditivos en las propiedades, se prepararon distintas formulaciones de arena de moldeo utilizando diferentes contenidos de bentonita sódica (6%, 8%, 10%) y de agua (3,5%, 5,5%, 7,5%) para los tres números AFS calculados. Se empleó 1,2% de polvo de carbón en todas las formulaciones. Se utilizó una nomenclatura para distinguir las arenas de olivino base y las arenas de moldeo preparadas. Las arenas de olivino base se denominan A, B y C, cuyos números AFS son 46, 60 y 107, respectivamente. Las arenas de moldeo preparadas con arena de olivino y aditivos (variando los contenidos de bentonita y de agua) se designan como A-1, B-1 y C-1.

### Determinación del contenido de carbono de la arena de moldeo

Se determinó el contenido de carbono de cada formulación de arena de moldeo preparada, para lo cual se utilizó el Método de Combustión Directa y Detección Infrarroja, denominado también Gasometría (Determinador simultáneo de carbono y azufre, marca LECO, modelo CS-200). El análisis de las muestras se realizó utilizando el procedimiento descrito en la Norma ASTM E1915-07a (2007).

### Obtención de las propiedades de las arenas de moldeo

Luego de preparadas las distintas formulaciones utilizando los diferentes contenidos de bentonita y de agua, se determinaron las siguientes propiedades: humedad, permeabilidad, compactabilidad y resistencia a la compresión en verde.

#### a) Ensayo de humedad

El contenido de humedad de las arenas de moldeo se determinó por diferencia de peso entre el peso de la

arena húmeda y el obtenido después del secado, para lo cual se colocaron 50 gramos de arena de moldeo en un platillo y éste a su vez se colocó durante 3 minutos dentro del equipo para el secado de arenas (Lámpara infrarroja, marca +GF+, modelo SPIT, temperatura: 105 °C). Después de alcanzado el tiempo de secado, se volvió a pesar la muestra de arena en una balanza de laboratorio para obtener el peso final de la arena. El contenido de humedad se calculó por medio de la siguiente fórmula:  $\%Humedad = [(50 - peso\ final) \times 100] / 50$ .

#### b) Ensayo de permeabilidad

Para realizar los ensayos de permeabilidad se prepararon probetas cilíndricas de arena compactada de acuerdo al procedimiento descrito en el manual de la AFS (American Foundry Society, 2001). Para este propósito se utilizaron aproximadamente 140 gramos de arena de moldeo y un equipo para compactar la arena (Aplisonador de arenas, marca Dietert-Detroit, modelo 315). Este equipo consta de un pisón que tiene un peso de 6,35 Kg, y una escala en la que se indica si la probeta tiene la altura requerida (5,08 cm) una vez que la arena ha sido compactada por el pisón después de tres golpes consecutivos. Mediante este procedimiento se obtienen probetas cilíndricas de arena de moldeo compactada de dimensiones 5,08 cm de diámetro x 5,08 cm de altura.

Para la determinación de la permeabilidad de las arenas de moldeo se utilizó un equipo medidor de permeabilidad (Permeámetro de lectura directa, marca Dietert) y se siguió el procedimiento descrito en el manual de la AFS (American Foundry Society, 2001) para realizar este tipo de ensayos. El permeámetro deja pasar 2000 cm<sup>3</sup> de aire a través de la probeta cilíndrica de arena compactada, de dimensiones 5,08 cm de diámetro x 5,08 cm de altura, que está confinada en un tubo porta-probeta, y se mide el tiempo  $t$  (en segundos, s) requerido para que esta cantidad de aire pase a través de la probeta. El número de permeabilidad se calculó utilizando la siguiente fórmula:  $P = 3007,2 / t$ .

### c) Ensayo de compactabilidad

Para realizar el ensayo de compactabilidad se empleó un equipo para apisonar la arena. De acuerdo a lo indicado en el manual de la AFS (American Foundry Society, 2001), en el procedimiento se utilizó una cantidad de arena de moldeo sin compactar contenida en un tubo porta-probeta cilíndrico de dimensiones 5,08 cm de diámetro x 12,7 cm de altura. La arena confinada en el tubo porta-probeta se colocó en el equipo en posición de ensayo y se dejó caer el pisón, cuyo peso es de 6,35 Kg, pausadamente tres veces sobre la arena. El porcentaje (%) de reducción de altura de la arena de moldeo es su compactabilidad, el cual se lee directamente en la escala de Compactabilidad (%) del equipo apisonador.

### d) Ensayo de resistencia a la compresión en verde

Se empleó una máquina de ensayos mecánicos de arenas (Máquina universal de resistencia de arenas, marca Dietert, modelo 405-A) para medir la resistencia a la compresión axial de probetas cilíndricas de arena compactada, según el procedimiento descrito en el manual de la AFS (American Foundry Society, 2001). Para cada condición de arena de moldeo se prepararon probetas cilíndricas de arena de norma AFS (5,08 cm de diámetro x 5,08 cm de altura) en el equipo apisonador de arenas, cuyo procedimiento fue descrito antes. En la máquina universal de resistencia se seleccionó el tipo ensayo a realizar (Compression, PSI) y se colocó la probeta en la posición de ensayo, luego se aplicó la carga de compresión axial en verde (intervalo de carga: 0 - 52 PSI). Se tomó nota del valor de resistencia a la compresión indicado en la máquina justo antes de la fractura de la probeta; este valor se dividió entre 10 para obtener la resistencia a la compresión en verde de la probeta de arena.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Composición química de la arena de olivino base

A partir del análisis químico elemental realizado a la arena de olivino mediante la técnica de Espectroscopía de Absorción Atómica de Llama (AA), se determinó la presencia de los elementos Si, Mg, Fe, Ca y Al, los cuales están asociados al mineral de olivino. En la tabla 2 se presenta la composición química (% en peso) de los principales óxidos de la arena analizada.

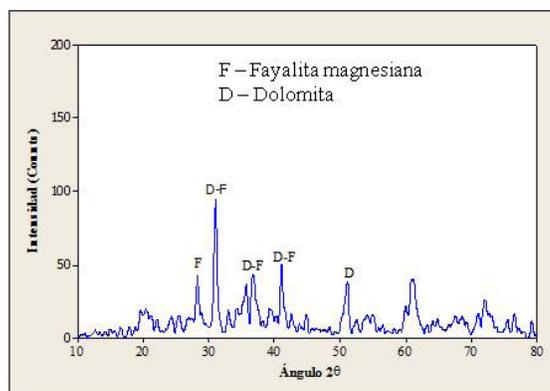
**Tabla 2.** Composición química de la arena (% peso)

SiO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Otros
43,71	21,80	10,27	5,74	3,13	balance

En esta tabla se observa que la sílice es el componente mayoritario en la arena analizada, seguido del óxido de magnesio y de otros componentes como el óxido de hierro, el óxido de calcio y el óxido de aluminio. Según datos reportados por las empresas Ilarduya y Cía. (2011) de España y Quipasur (2011) de Chile, la composición química típica de la arena de olivino que ellos comercializan para la industria de la fundición contiene los siguientes componentes: MgO: 48%; SiO<sub>2</sub>: 41%; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 8%. Otro ejemplo, es la arena de olivino para fundición que se produce en Noruega, uno de los principales productores de olivino a nivel mundial. Dicha arena tiene la siguiente composición química: SiO<sub>2</sub>: 41,5%; MgO: 49,7%; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 7,23%, CaO: 0,26%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 0,72%, otros: 0,6% (Kleiv & Thornhill, 2011). En general, la arena de olivino para usos en fundición que se produce en diversos países del mundo contiene principalmente SiO<sub>2</sub>: 40-43%; MgO: 45-51%; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 7-8%; CaO: 0,2-0,8%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 1,8-2% (Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2006).

### Análisis por difracción de rayos x

En la figura 1 se aprecia el difractograma de una muestra de arena de olivino base. En esta figura se pueden observar picos de difracción de las fases fayalita magnesiana (Fe,Mg)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> (JCPDS, ficha N° 31-0633, 1997) y dolomita CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (JCPDS, ficha N° 36-0426, 1997). A partir de los resultados obtenidos por DRX, se determinó semicuantitativamente que la arena de olivino analizada contiene aproximadamente entre 79% de fayalita magnesiana y 21% de dolomita.



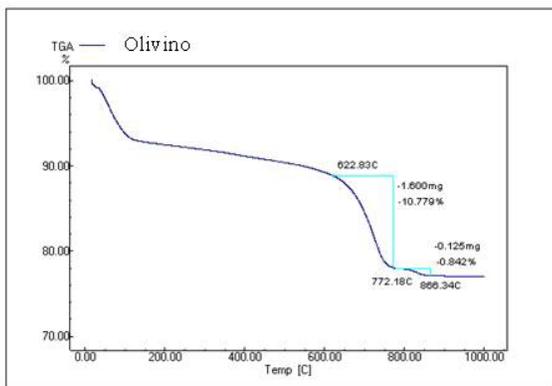
**Figura 1.** Difractograma de la arena de olivino donde se muestran picos de difracción correspondientes a las fases fayalita magnesiana y dolomita. Los picos de difracción de intensidad máxima de la fayalita magnesiana y de la dolomita se indican en la figura

### Análisis termogravimétrico

La descomposición térmica de la arena hasta 1000 °C se examinó por la técnica ATG. En la figura 2 se observa la

curva de descomposición térmica de una muestra analizada de arena de olivino. En el termograma resultante se detectó una pérdida de masa de 10,79% (1,60 mg) entre 622 y 772 °C y otra pérdida de masa de 0,84% (0,125 mg) se detectó entre 772 y 866 °C. La pérdida de masa observada en el intervalo de temperaturas entre 200 y 600 °C puede ser atribuida al agua enlazada químicamente. La pérdida de masa que ocurrió en el intervalo de temperaturas entre 600 y 772 °C pudiera corresponder a la liberación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del ión carbonato durante la descomposición térmica de la dolomita. La otra pérdida de masa detectada entre 772 y 866 °C pudiera ser atribuida a la liberación de dióxido de carbono originado durante la descomposición del carbonato de calcio. Varios autores afirman que la descomposición térmica de la dolomita tiene lugar en dos etapas y en ambas ocurre la liberación de dióxido de carbono (McIntosh *et al.*, 1990; Gunasekaran & Anbalagan, 2007; Shahraki *et al.*, 2009). La descomposición de la dolomita puede ocurrir entre 750 y 781 °C, dando lugar a la formación de CaCO<sub>3</sub> y MgO, mientras que la descomposición del CaCO<sub>3</sub> se produce entre 781 y 919 °C (Shahraki *et al.*, 2009).

El dióxido de carbono que procede de los carbonatos presentes en la arena de olivino base podría contribuir a desmejorar tanto la calidad superficial de las piezas coladas como sus propiedades, si este gas se encuentra en proporciones importantes, debido a la formación de porosidades (pinholes) en la superficie de las piezas (Granlund, 1999; Quintero, 2009).



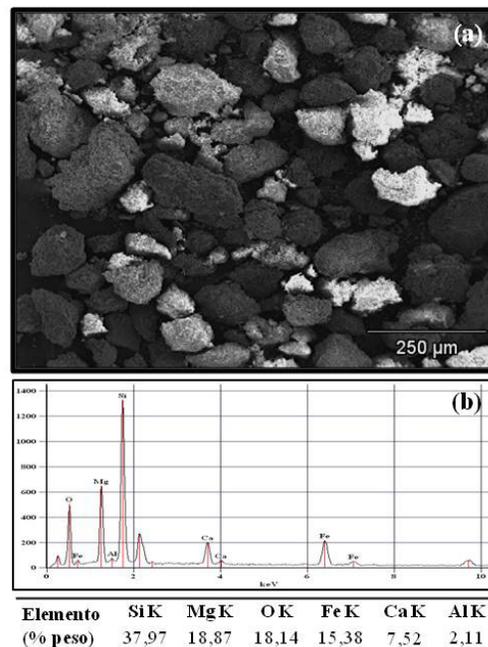
**Figura 2.** Termograma ATG de una muestra de arena de olivino. En la figura se indican las pérdidas de masa correspondientes a la liberación de dióxido de carbono durante la descomposición de los carbonatos

Aún cuando la arena de olivino es usada como arena de contacto en los moldes de arena debido a que tiene mayor conductividad térmica comparativamente con otras arenas, se debe tener presente que la arena de olivino, objeto de este estudio, tiene un importante contenido de dolomita que al descomponerse libera dióxido de carbono de los carbonatos.

### Análisis morfológico de la arena de olivino base

En la figura 3 se aprecia la morfología de los granos de una muestra de arena observada mediante MEB y el respectivo microanálisis químico (general) por EDS. La morfología que presentan los granos de la arena analizada (figura 3a) podría considerarse entre angular y subangular, con respecto tanto a su redondez como a la esfericidad, según la clasificación de los granos de arena que se basa en su morfología externa (Foseco Ferrous Foundryman's Handbook, 2000; Sertucha & Suárez, 2005). En la figura 3(b) se presenta el microanálisis químico por EDS de la arena, el cual muestra que los granos son ricos en Si principalmente, seguido de Mg, O, Fe, y de Ca y Al en menor proporción.

Las arenas que tienen granos angulares resultan, en parte, apropiadas para usos en fundición debido a que este tipo de granos proporciona un efecto de anclaje entre ellos que incrementa la resistencia del sistema de arenas (Sociedad Norteamericana de Fundidores, 1994; Quintero, 2009). En las arenas de olivino para fundición producidas en diversos países del mundo también se encuentra que los granos de estas arenas tienen morfología angular, con números AFS de 20, 30, 60, 90 y 120 (Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2006).



**Figura 3.** Micrografía por MEB y microanálisis químico por EDS de una muestra de arena de olivino: (a) en la imagen se observa la morfología de los diferentes granos de la arena (50X); (b) el microanálisis químico muestra la presencia mayoritaria de Si, seguido de Mg, O, Fe, y de Ca y Al en menor proporción

### Análisis granulométrico de la arena de olivino base

En las figuras 4(a) a 4(c) se aprecian las curvas de distribución de tamaños de grano (peso retenido en cada tamiz) de las arenas de olivino base A, B y C con sus respectivos números de fineza AFS. En la figura 4(a) se muestra la curva de distribución de tamaños de la arena A (AFS 46; 0,37 mm), en la cual la campana de distribución (% peso retenido) está desplazada hacia la izquierda, hacia los tamices de mayor apertura de malla, lo que implica una granulometría más gruesa. Además, la arena A presenta una fracción granulométrica principal de tres tamices (arena de tres tamices), dado que en cada uno de los tres tamices contiguos quedó retenida más del 10% de la arena base. Por otra parte, en la figura 4(b) se observa que la arena B (AFS 60; 0,27 mm) presenta un comportamiento similar al anterior, donde la curva de peso retenido tiende a ser desplazada hacia la izquierda, hacia los tamaños de grano más gruesos. Sin embargo, a diferencia de la arena A, la arena B posee una mejor distribución granulométrica, puesto que, aunque el mayor porcentaje en peso de material está retenido en el tamiz 40 (apertura de malla = 0,42 mm), la arena B presenta una fracción granulométrica principal de cinco tamices (arena de cinco tamices), ya que en cada uno de los cinco tamices contiguos quedó retenido más del 10% de la arena tamizada. En la figura 4(c), correspondiente a la arena C (AFS 107; 0,15 mm), se aprecia una distribución abierta de tamaños de granos, donde el mayor porcentaje de material retenido se ubica en el tamiz 140 (apertura de malla = 0,105 mm). La arena C presenta una fracción granulométrica principal de cuatro tamices (arena de cuatro tamices), debido a que en cada uno de los cuatro tamices contiguos quedó retenido por lo menos 10% de la arena. Según la experiencia práctica y lo reportado en la literatura, la distribución de tamaños de la arena C resulta conveniente. Este tipo de distribución de tamaños proporciona buenas propiedades mecánicas en la arena de moldeo debido a que favorece la superficie de contacto entre las partículas, con lo cual se incrementa la resistencia mecánica y la permeabilidad (Beeley, 2001; Quintero, 2009; Sociedad Norteamericana de Fundidores, 1994). Sin embargo, a pesar de contar con dicha distribución de tamaños, la arena C posee una elevada cantidad de finos (26,8%) mayor al 5% permitido. En la tabla 3 se muestran las fracciones gruesas ( $F_g$ ) y finas ( $F_f$ ) de las arenas de olivino A, B y C, y sus correspondientes números de fineza AFS.

**Tabla 3.** Características de las arenas de olivino base

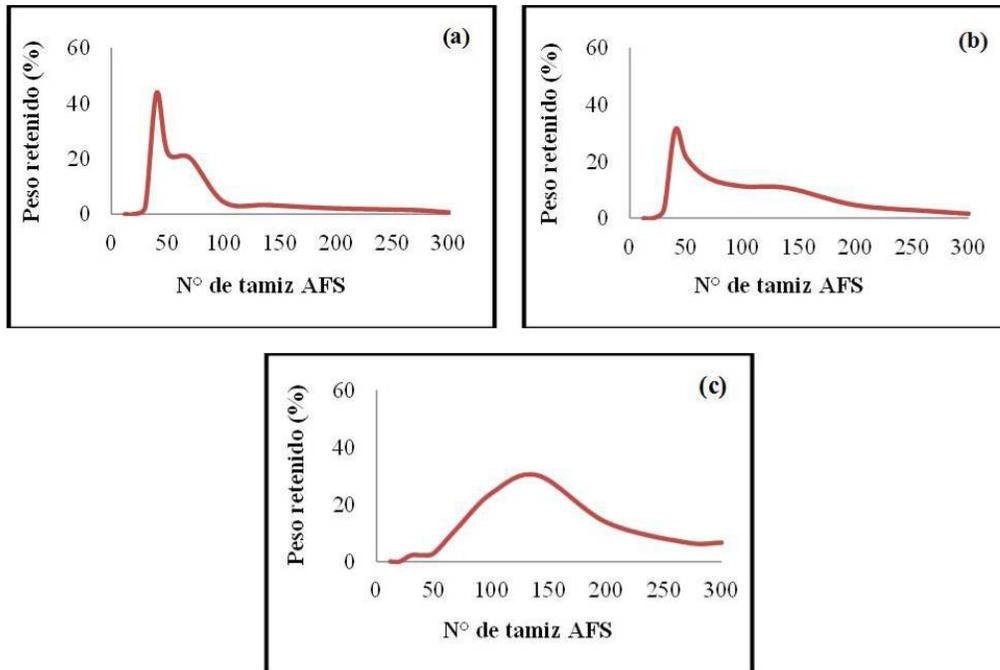
Arenas de olivino	AFS	Tipo de arena (distribución)	$F_g$ (%)	$F_f$ (%)
A	46	Tres tamices	2,4	4,0
B	60	Cinco tamices	3,0	8,6
C	107	Cuatro tamices	2,2	26,8

$F_g$ : fracción gruesa

$F_f$ : fracción fina

La fracción gruesa corresponde al material retenido en los tamices de mayor apertura (hasta el tamiz 30) y lo total retenido debe ser menor a 4%. En este sentido, todas las arenas de olivino preparadas están dentro de lo especificado para la fracción gruesa. Por otra parte, la fracción fina está constituida por el material retenido en los tamices de menor apertura (200, 270, fondo) y lo total retenido deber ser menor o igual a 5%. Al respecto, sólo la arena A cumple con este criterio establecido, encontrándose que las arenas B y C poseen un exceso de fracción fina. La fracción fina total debe ser una cantidad limitada, lo cual es una exigencia necesaria debido a que un exceso de partículas finas hace que éstas se aglomeren durante el proceso de mezclado, además disminuyen la permeabilidad y demandan mayor cantidad de aglomerante. Sin embargo, aunque el contenido de finos debe limitarse como se ha explicado antes, siempre es deseable una mínima cantidad de granos finos (Heine *et al.*, 1967; Quintero, 2009).

La distribución granulométrica de las arenas base podría garantizar buenas propiedades mecánicas en las arenas de moldeo preparadas, particularmente si se logra ajustar el contenido de finos, puesto que las partículas finas contribuyen a que exista menor espaciamiento entre partículas, asegurando un mayor empaquetamiento, lo que mejora la compactabilidad y la resistencia (Sociedad Norteamericana de Fundidores, 1994; Quintero, 2009). La mayoría de las propiedades de las arenas dependen de la distribución de tamaños así como del tamaño de grano promedio; por tanto, la granulometría es una de las variables que afecta mayormente las propiedades de las arenas de moldeo. Además del tamaño de grano promedio, la distribución granulométrica tiene un efecto pronunciado en la permeabilidad. Al igual que la composición química, el número de fineza AFS y la distribución granulométrica son características de gran importancia de la arena base (Heine *et al.*, 1967).



**Figura 4.** Curvas de distribución granulométrica de las arenas de olivino base: a) Arena A (AFS 46); b) Arena B (AFS 60); c) Arena C (AFS 107)

#### Contenido de carbono de las arenas de moldeo

Los aditivos de carbón generalmente son agregados a los sistemas de arenas para ayudar a reducir la penetración de metal y mejorar el acabado superficial de las piezas coladas. Se considera que la cantidad de carbón adicionado a las arenas de moldeo es importante porque ayuda a crear una atmósfera reductora que cubre la superficie del molde con carbón lustroso. El polvo de carbón, añadido en la preparación de la arena de moldeo, mejora la moldeabilidad de la arena y el acabado superficial de las piezas (Heine *et al.*, 1967; Strobl, 2000). El contenido de carbono de las arenas de moldeo (arenas con aditivos), determinado mediante la técnica de Gasometría, se ubica en el intervalo de 3 y 3,14% para la arena A-1, entre 2,99 y 3,44% para la arena B-1, y entre 2,81 y 2,97% para la arena C-1; estos valores son mayores al 1,2% de polvo de carbón empleado en la formulación de estas arenas. Por tanto, el incremento en el contenido de carbono de las muestras analizadas confirma la presencia de carbonatos en la arena de olivino.

#### Propiedades de las arenas de moldeo

##### a) Humedad

La figura 5 muestra la variación de la humedad de las arenas con el contenido de agua. En la figura 5(a) se representa el comportamiento de las arenas de moldeo con los diferentes contenidos de agua y 6% de bentonita

empleados en la formulación de las arenas, apreciándose para todos los casos un aumento de la humedad a medida que se incrementa el contenido de agua. Se observa que la humedad es mayor en la arena C-1 en comparación con las arenas A-1 y B-1, conforme aumenta el contenido de agua. Para estos contenidos de agua y de bentonita los valores de humedad obtenidos en las arenas evaluadas es como sigue: entre 0,5 y 1,2% para la arena A-1, entre 1,1 y 1,4% para la arena B-1, y entre 1,6 y 2,2% para la arena C-1.

En la figura 5(b) se observa el comportamiento que presentan las arenas de moldeo preparadas con diferentes contenidos de agua y 8% de bentonita. La humedad se incrementa con una tendencia parecida al caso precedente, en la medida que aumenta el contenido de agua; observándose mayor contenido de humedad en la arena C-1. Para los contenidos de agua y de bentonita utilizados en este caso los valores de humedad obtenidos en las arenas son los siguientes: entre 0,8 y 1,5% para la arena A-1, entre 1,2 y 1,4% para la arena B-1, y entre 1,9 y 2,4% para la arena C-1. Por otra parte, en la figura 5(c) se observa una disminución de la humedad de las arenas B-1 y C-1 que contienen 5,5% de agua y 10% de bentonita, donde ambas arenas presentan una tendencia similar en su comportamiento. En cuanto a la arena A-1 se observa que se incrementa la humedad a medida que aumenta el contenido de agua. La arena B-1 presentó los menores valores de humedad en comparación con las arenas A-1 y C-1, lo cual representa un comportamiento diferente a los dos casos anteriores con 6 y 8% de bentonita, figuras

5(a) y 5(b), respectivamente.

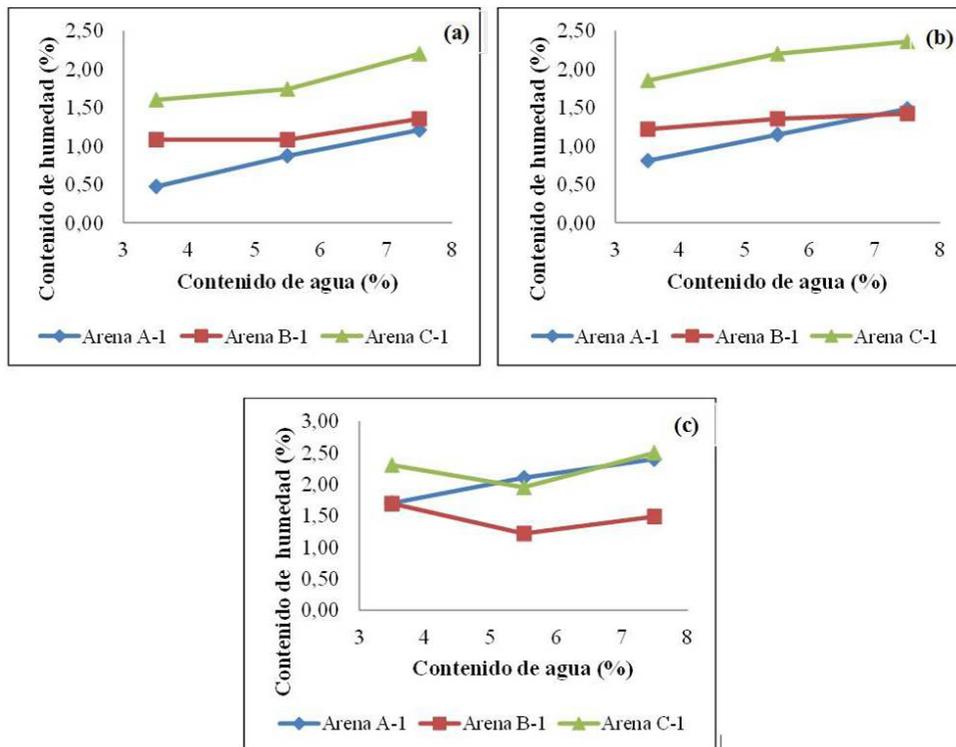
Para todos los contenidos de agua y 10% bentonita utilizados los valores de humedad observados en las arenas evaluadas se encuentran entre 1,7 y 2,4% para la arena A-1, entre 1,5 y 1,7% para la arena B-1, y entre 2,3 y 2,5% para la arena C-1.

En los resultados se observa que en la mayoría de los casos, en la medida que se incrementa la cantidad de agua añadida al sistema de arenas, ocurre un aumento de la humedad. Este comportamiento es consistente con las observaciones realizadas por Ademoh (2008), en los resultados de estudios en arenas de moldeo a base de arena de sílice, quien afirma que el agua inicial añadida a la arena es absorbida por el aglomerante hasta la saturación. Después que se alcanza la saturación de agua en la mezcla de arena, cualquier cantidad de agua adicionada es mantenida como agua libre obteniéndose así el incremento del contenido de humedad, como lo observado en la figura 5. Por otra parte, se puede afirmar que para alcanzar la humedad necesaria cuando se prepara la arena de moldeo, debe ajustarse el contenido de agua añadida hasta alcanzar los valores de humedad

requeridos, y de este modo permitir que la arena junto con la arcilla aglomerante desarrolle buenas propiedades. En la preparación de las arenas de moldeo se necesita que el contenido de agua se encuentre entre 1,5 y 8% para activar la arcilla aglomerante y permitir el desarrollo de plasticidad y resistencia (Gerin, 1972; Strobl, 2000; Ademoh, 2008; Quintero, 2009). No obstante, el contenido de agua añadida debe ser controlado debido a que produce la formación de vapor de agua en la cavidad del molde y este gas en exceso puede causar defectos en las piezas fundidas.

#### b) Permeabilidad

Las figuras 6(a) a 6(c) muestran la variación de la permeabilidad de las arenas de moldeo con el contenido de agua. En la figura 6(a) se observan los valores de permeabilidad que presentan las arenas que contienen 6% de bentonita. Se aprecia que en la arena A-1 la permeabilidad es mayor, con valores entre 330 y 348 ml/min, mientras que en las arenas B-1 y C-1 la permeabilidad presenta menores valores. Para estas arenas los valores de permeabilidad están entre 281 y 306 ml/min y entre 283 y 290 ml/min, respectivamente.



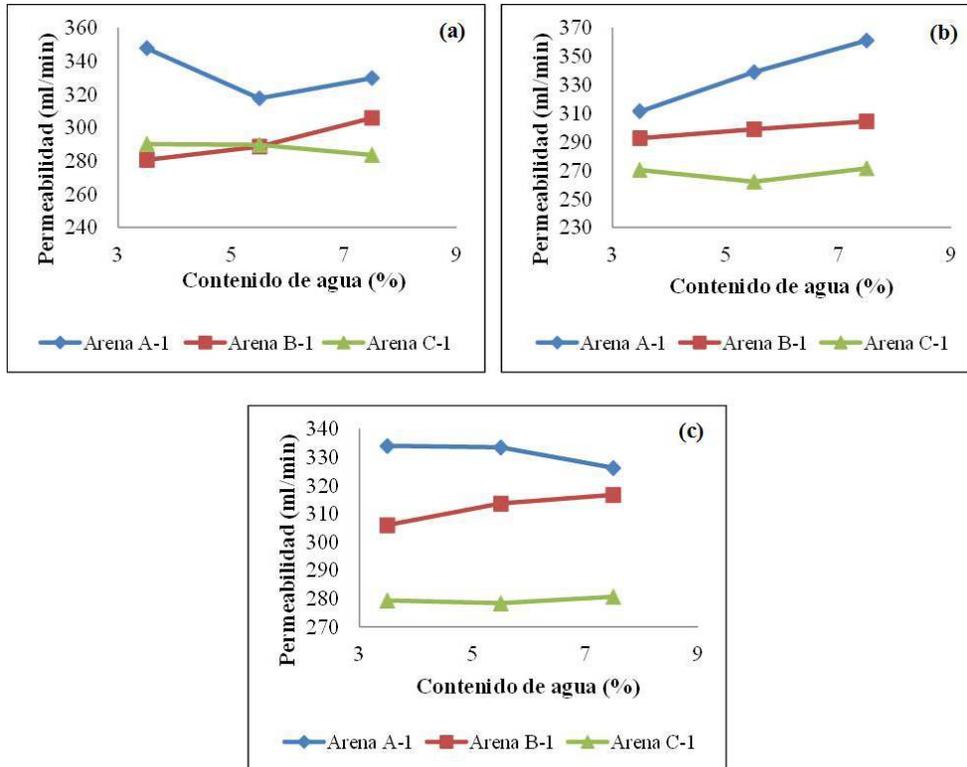
**Figura 5.** Variación de la humedad con el contenido de agua para los tres casos de arenas de moldeo evaluadas: a) 6% de bentonita; b) 8% de bentonita; c) 10% de bentonita

En las figuras 6(b) y 6(c) se observa un incremento en los valores de la permeabilidad de las arenas con el aumento del contenido de agua, en la mayoría de los casos. En la

figura 6(b) correspondiente a las arenas preparadas con 8% de bentonita, se destaca también que la arena A-1 presenta mayor permeabilidad (entre 311 y 361 ml/min) que las

arenas B-1 (entre 292 y 304 ml/min) y C-1 (entre 270 y 271 ml/min). En la figura 6(c) que corresponde a las arenas que contienen 10% de bentonita, se encontró igualmente que la arena A-1 presenta mayores valores de permeabilidad (entre 326 y 334 ml/min) que las arenas B-1 (entre 305 y 316 ml/min) y C-1 (entre 279 y 280 ml/min). En estos resultados es notable que la arena A-1 mantiene su tendencia a presentar mayores valores de permeabilidad para todos los casos evaluados, luego le siguen los valores de permeabilidad observados para las arenas B-1 y C-1, independientemente

del contenido de bentonita. Por consiguiente, el tamaño de los granos de las arenas base empleadas en la preparación de las arenas A-1, B-1 y C-1 influye en la permeabilidad de estas arenas de moldeo, obteniéndose mayores valores de permeabilidad en la arena de grano grueso. El tamaño de grano es uno de los factores más importantes que afectan la permeabilidad. Por lo general, las arenas que tienen un tamaño de grano grueso presentan mayor permeabilidad (Heine *et al.*, 1967; Quintero, 2009).



**Figura 6.** Variación de la permeabilidad de las arenas de moldeo con el contenido de agua para los tres casos de arenas de moldeo evaluadas: a) 6% de bentonita; b) 8% de bentonita; c) 10% de bentonita

En los resultados también se observa el comportamiento de cada una de las arenas de moldeo evaluadas en función de los diferentes contenidos de agua y de bentonita, destacando que en la mayoría de los casos se obtiene un incremento de la permeabilidad a medida que aumenta el contenido de agua. Según datos de la literatura, en arenas de moldeo a base de arena de sílice, el contenido de agua afecta la permeabilidad, porque el agua en exceso tiende a acumularse en los intersticios, ocasionando que esta propiedad disminuya (Heine *et al.*, 1967; Gerin, 1972). Sin embargo, este comportamiento no ocurrió en todas las formulaciones de las arenas de moldeo evaluadas, pues de acuerdo a los resultados antes mostrados al incrementarse el contenido de agua los valores de permeabilidad presentan un comportamiento variable, es decir, la permeabilidad en

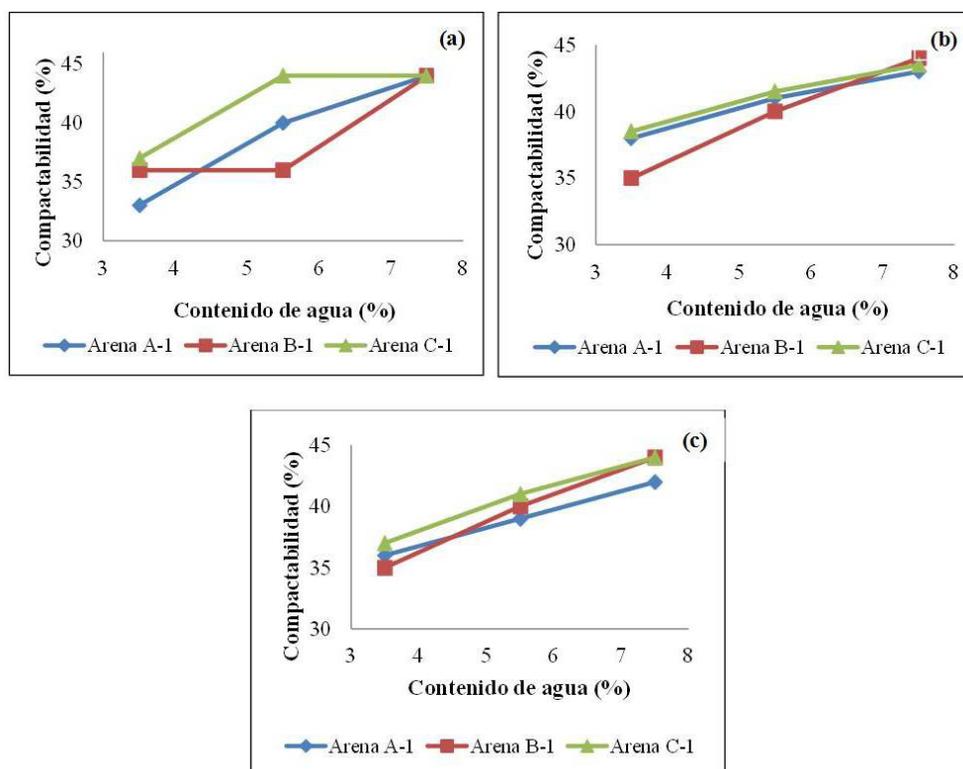
algunos casos aumenta y en otros casos disminuye como ocurrió en las arenas A-1 y C-1 que contienen 6% de bentonita y en la arena A-1 que contiene 10% de bentonita. Adicionalmente se observa que todos los valores de permeabilidad obtenidos son bastantes altos y de mayor orden de magnitud que los reportados en la literatura para los sistemas de arenas de moldeo a base arena de sílice (Dionicio *et al.*, 2004; Ayoola *et al.*, 2010). Un incremento en la permeabilidad normalmente indica una estructura más abierta en la arena compactada, y si el incremento continúa pueden surgir inconvenientes en el momento de la colada del metal líquido, como por ejemplo expansión del molde, o la aparición de defectos tales como penetración de metal y rugosidad superficial en la pieza fundida (Granlund, 1999). Este es un resultado que hay que tomar en consideración

pues una alta permeabilidad puede conducir a defectos importantes en la pieza. Por el contrario, una disminución de la permeabilidad indica un empaquetamiento cerrado de la estructura de la arena, y si hay una rápida evolución de gas en la arena de moldeo que posee baja permeabilidad, la presión de gas puede exceder la presión metalostática del metal líquido y por tanto, ese gas estará forzado a penetrar dentro del metal, lo que podría generar cavidades por gas (sopladuras) y porosidad fina (pinholes) en la pieza (Granlund, 1999; Strobl, 2000; Quintero, 2009).

### c) Compactabilidad

En las figuras 7(a) a 7(c) se observa la variación de la compactabilidad con el contenido de agua y para cada contenido de bentonita usado en la formulación de las arenas

de moldeo. En estas gráficas se evidencia un incremento de la compactabilidad de las arenas conforme aumenta el contenido de agua, independientemente del contenido de bentonita. Los valores de compactabilidad obtenidos son los siguientes: entre 33-44% para la arena A-1, entre 35-44% para la arena B-1, y entre 37 y 44% para la arena C-1. La compactabilidad está influenciada principalmente por los contenidos de arcilla y de agua. Según lo reportado en la literatura (Beeley, 2001; Tartera, 2014), la compactabilidad de una arena de moldeo tradicional debe estar en el intervalo de 35-55%, o puede oscilar alrededor del 45%. Para arenas apropiadas para moldeo de alta presión los valores deben ser más bajos y pueden situarse entre 35 y 40%, mientras que valores más altos de compactabilidad son adecuados para apisonado a mano.



**Figura 7.** Variación de la compactabilidad de las arenas de moldeo con el contenido de agua para los tres casos de arenas de moldeo evaluadas: a) 6% de bentonita; b) 8% de bentonita; c) 10% de bentonita

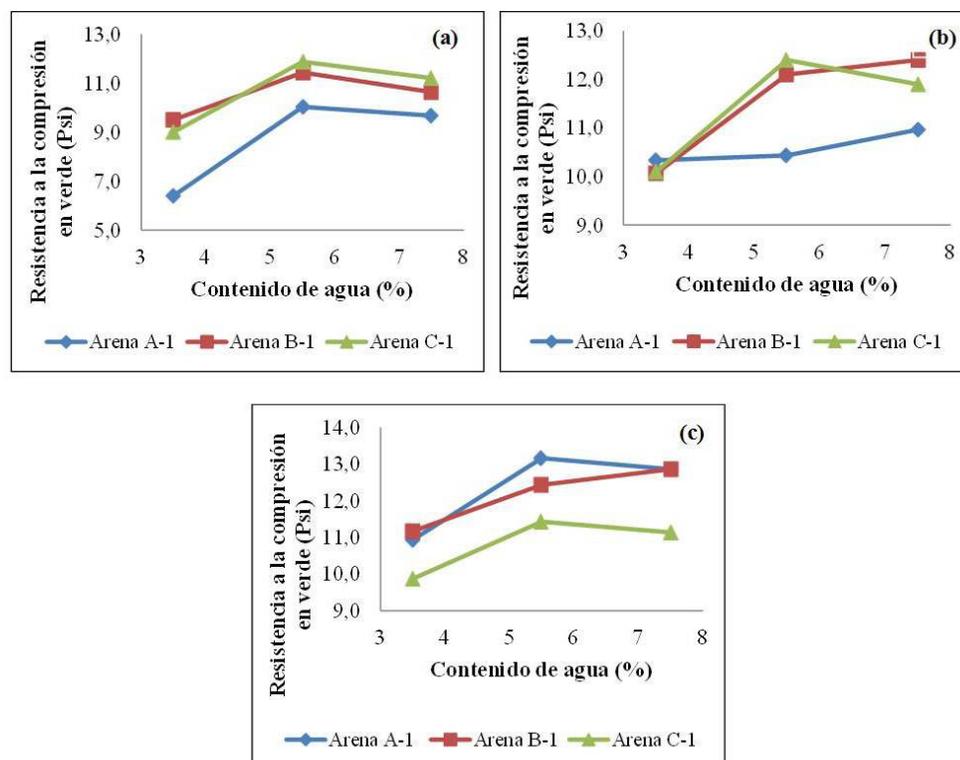
Como se observa en los resultados para la mayoría de los casos de las arenas evaluadas, independientemente del contenido de agua y de bentonita empleados, la compactabilidad se mantuvo en el intervalo comprendido entre 33 y 44%; estos resultados permiten describir estas arenas como arenas para moldeo en las que se deben utilizar métodos de moldeo de alta presión.

El control de la compactabilidad es importante para realizar ajustes en la composición de la arena y asegurar que se efectúe la correcta adición de agua para alcanzar propiedades constantes en la arena de moldeo, pues constituye un índice de referencia para la determinación de la demanda de humedad de cualquier mezcla de arena. También, controlar la compactabilidad ayuda a alcanzar condiciones óptimas de aglomeración de la arena (Salcines & Valdes, 2000; Strobl, 2000; Tartera, 2014).

#### d) Resistencia a la compresión en verde

En las figuras 8(a) a 8(c) se muestra la variación de la resistencia a la compresión en verde de las arenas de moldeo con los diferentes contenidos de agua y de bentonita. Un comportamiento importante que se distingue en estas figuras para la mayoría de los casos estudiados, es que conforme aumenta el contenido de agua se incrementa la resistencia a la compresión en verde hasta un punto conocido como el punto de temple (“temper point”). El punto de temple es el punto en el cual se obtiene la mayor resistencia a la compresión de la arena de moldeo en verde. Después del punto de temple, los incrementos adicionales de agua resultan en una disminución de la resistencia a la compresión en verde (Strobl, 2000). En la figura 8 se observa que los puntos de temple están localizados para un contenido de 5,5 % de agua en seis de las nueve formulaciones de las arenas de moldeo estudiadas, en las que se registraron los valores de resistencia máxima en verde asociadas con el punto de temple. Estas formulaciones corresponden a las arenas A-1, B-1 y C-1 con 6% de bentonita y sus respectivos valores de resistencia máxima en verde son 10 Psi; 11,4 Psi y 11,9 Psi (figura 8a); la arena C-1 con 8% de bentonita registró un valor de resistencia máximo en verde de 12,4 Psi (figura 8b); y las arenas A-1 y C-1 con 10% de bentonita, las cuales mostraron valores máximos de resistencia en verde de 13,2 Psi y de 11,4 Psi, respectivamente (figura 8c). Para un contenido de agua mayor la resistencia disminuye para los tres tipos de arenas. El comportamiento observado en las arenas de moldeo estudiadas, con respecto a la localización del punto de temple, es muy similar al reportado por otros autores que han investigado los sistemas de arenas de moldeo a base de arena de sílice (Sociedad Norteamericana de Fundidores, 1994; Strobl, 2000; Noguez *et al.*, 2005; Ayoola *et al.*, 2013). En las otras tres formulaciones restantes que no presentaron punto de temple se observa que la resistencia en verde se incrementa a medida que aumenta el contenido de agua. Las formulaciones antes referidas corresponden a las arenas A-1 y B-1 con 8% de bentonita y 7,5% de agua en

las que se registraron valores de resistencia máxima de 11 Psi y 12,4 Psi, respectivamente; y la arena B-1 con 10% de bentonita y 7,5% de agua, cuya resistencia máxima en verde es de 12,9 Psi. Los valores de resistencia a la compresión en verde observados en todas las formulaciones de las arenas de moldeo evaluadas son comparables a aquellos obtenidos para arenas de moldeo preparadas a base de arena de sílice que han sido reportados por otros autores (Strobl, 2000; Dionicio *et al.*, 2004; Quintero, 2009). En la figura 8 también se observa que la arena A-1 incrementa sus valores de resistencia en verde conforme aumenta el contenido de bentonita. Adicionalmente, la arena A-1 con 10% de bentonita desarrolló mayores valores de resistencia en verde para todos los contenidos de agua utilizados, en comparación con la resistencia en verde obtenida en las arenas B-1 y C-1. La resistencia a la compresión en verde depende, entre otros factores, del tamaño de grano, del contenido de agua y de la cantidad de bentonita (Heine *et al.*, 1967; Lamas & Valderrama, 2006; Tartera, 2014). Por lo general, altos contenidos de bentonita traen como resultado un aumento en la resistencia, debido a que se refuerzan los enlaces creados entre los granos de arena, el agua y la arcilla. Sin embargo, si se satura con bentonita la arena de moldeo cualquier incremento en la cantidad de bentonita no causa aumento en la resistencia a la compresión en verde, pues la arena está completamente enlazada. Se considera que las mezclas de arena saturadas con arcillas contienen entre 8 y 12% de arcilla tipo bentonita (Quintero, 2009). Por otra parte, el agua presente en la formulación de las arenas de moldeo activa la bentonita en la arena, lo que ocasiona que la arena desarrolle plasticidad y resistencia. No obstante, la bentonita absorbe agua hasta una cierta cantidad. Solamente el agua absorbida por la bentonita es la que parece ser efectiva en el desarrollo de la resistencia de la arena. El contenido de agua adicional puede actuar como lubricante, y hacer que la arena sea más moldeable pero de baja resistencia (Heine *et al.*, 1967).



**Figura 8.** Variación de la resistencia a la compresión en verde de las arenas de moldeo con el contenido de agua para los tres casos de arenas de moldeo evaluadas: a) 6% de bentonita; b) 8% de bentonita; c) 10% de bentonita

## CONCLUSIONES

El análisis de la composición química de la arena de olivino permitió determinar que contiene  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Al comparar con la composición química de arenas de olivino de otros países se encontró que en la arena analizada la sílice es el componente mayoritario, seguido del óxido de magnesio. Por otra parte, en los resultados de difracción de rayos X se encontró que la arena de olivino estudiada está constituida principalmente por las fases fayalita magnésiana y dolomita.

Mediante la realización del análisis térmico ATG a la muestra de arena se detectó una pérdida de masa de 10,79% (1,60 mg) entre 622 y 772 °C, y otra pérdida de masa de 0,84% (0,125 mg) se detectó entre 772 y 866 °C. Estas pérdidas de masa observadas en el termograma resultante se pueden atribuir a la liberación de dióxido de carbono de los carbonatos de la dolomita durante su descomposición térmica. Se debe tener presente que el dióxido de carbono liberado podría contribuir a desmejorar tanto la calidad superficial de las piezas coladas como sus propiedades, si este gas se encuentra en proporciones importantes.

La observación de los granos de la arena mediante MEB permitió apreciar que éstos tienen morfología angular y

subangular. El respectivo microanálisis químico (general) por EDS indica que los granos son ricos en Si principalmente, seguido de Mg, O, Fe, y de Ca y Al en menor proporción.

A partir del análisis granulométrico realizado a las arenas base se encontró que la arena A tiene un número de fineza AFS de 46 y es arena de tres tamices, la arena B tiene un número de fineza AFS de 60 y es arena de cinco tamices, y la arena C tiene un número de fineza AFS de 107 y es arena de cuatro tamices. De las tres arenas base estudiadas, el tipo de distribución granulométrica de cuatro tamices que presentó la arena C puede resultar conveniente para mejorar las propiedades mecánicas de la arena de moldeo, sin embargo, esta arena tiene un alto contenido de finos (26,8%) muy superior al máximo permitido. Es conveniente limitar la cantidad de partículas finas de las arenas puesto que los finos tienden a aglomerarse durante el proceso de mezclado, consumen mayor cantidad de aglomerante y afectan la permeabilidad.

El contenido de carbono de las arenas de moldeo preparadas (A-1, B-1 y C-1) determinado mediante la técnica de Gasometría, se ubica en el intervalo entre 2,81 y 3,44%. Estos valores son mayores al 1,2% de polvo de carbón empleado en la formulación de estas arenas. Este incremento en el contenido de carbono de las muestras

analizadas confirma la presencia de carbonatos en la arena de olivino base.

La humedad de las arenas de moldeo se incrementa a medida que aumenta el contenido de agua y de bentonita. Se aprecia que los valores de humedad son mayores en la arena C-1 conforme se incrementa el contenido de bentonita; en esta arena se alcanzaron valores de humedad en el intervalo entre 2,2 y 2,5% en comparación con los valores de humedad obtenidos en las arenas A-1 (0,47 - 2,4%) y B-1 (1,08 - 1,49%). Durante la preparación de la arena de moldeo debe ajustarse el contenido de agua añadida hasta alcanzar los valores de humedad requeridos para que la arena desarrolle buenas propiedades.

En la arena A-1 se observaron más altos valores de permeabilidad que en las arenas B-1 y C-1, independientemente del contenido de bentonita y de agua. Todos los valores de permeabilidad obtenidos son de mayor orden de magnitud que los reportados en la literatura para sistemas de arenas de moldeo a base de arena de sílice.

La compactabilidad de las arenas de moldeo se incrementa conforme aumenta el contenido de agua, independientemente del contenido de bentonita utilizado. Para todos los casos estudiados, independientemente de los contenidos de agua y de bentonita, la compactabilidad se mantuvo en el intervalo comprendido entre 33 y 44%, que son valores de compactabilidad medianamente bajos, lo que permite describir estas arenas como arenas apropiadas para moldeo de alta presión.

La resistencia a la compresión en verde de las arenas A-1, B-1 y C-1 se incrementó con los contenidos de agua y de bentonita. Para un contenido de 10% de bentonita la arena A-1 desarrolló mayores valores de resistencia que las arenas B-1 y C-1. Los puntos de temple se localizaron para un contenido de 5,5 % de agua en seis de las nueve formulaciones estudiadas, donde los máximos valores de resistencia en verde se encuentran en el intervalo de 10 a 11,9 Psi para 6% de bentonita, en 12,4 Psi para 8% de bentonita, y de 11,4 a 13,2 Psi para 10% de bentonita. Los valores de resistencia a la compresión en verde observados en las arenas de moldeo estudiadas son comparables a aquellos obtenidos para arenas de moldeo a base de arena de sílice reportados por otros autores.

Los resultados presentados en este trabajo aún no son concluyentes para considerar la factibilidad de utilizar la arena de olivino objeto de este estudio para la fabricación de moldes para fundición. Investigaciones que aún están en desarrollo ayudarán a proponer cambios en la preparación

de la arena base a fin de mejorar las características de ésta, lo que llevará a plantear formulaciones de la arena de moldeo más apropiadas, con la finalidad de garantizar un desempeño óptimo de la arena durante la fabricación del molde y posterior colada del metal.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales y al CIDEMEX de la Universidad Central de Venezuela por el apoyo académico otorgado durante el desarrollo de este trabajo, y al Prof. Jesús Batista, del Instituto Universitario de Tecnología “Federico Rivero Palacio” – IUT Región Capital, por la colaboración prestada para la realización de algunos ensayos.

## REFERENCIAS

- ADEMOH, N. A. (2008). Evaluation of the Foundry Properties of River Niger Sand Behind Ajaokuta Steel Company Limited, Ajaokuta, Nigeria. *American-Eurasian Journal of Scientific Research*, 3 (1); pp. 75-83.
- AMERICAN FOUNDRY SOCIETY. (2001). *Mold & Core Test Handbook*. (3rd Edition), USA, AFS.
- ASM HANDBOOK. (2002). *Casting*. (10th Edition), USA, ASM International, Vol. 15, pp. 450-455.
- ASTM E1915-07a. (2007). *Standard Test Methods for Analysis of Metal Bearing Ores and Related Materials by Combustion Infrared-Absorption Spectrometry*. American Society for Testing and Materials. USA.
- AYOOLA, W. A., ADEOSUN, S. O., OYETUNJI, A., OLADOYE, A. M. (2010). Suitability of Oshogbo Sand Deposit as Moulding Sand. *The Kenya Journal of Mechanical Engineering*, 6 (1); pp. 33-41.
- AYOOLA, W. A., OYETUNJI, A., ADEOSUN, S. O., SEKUNOWO, O. I., BODUDE, M. O. (2013). Investigation of Foundry Properties of Oshogbo and Saki Silica Sand Deposits. *Journal of Science and Technology, Daffodil International University*, 8 (2); pp. 11-17.
- BEELEY, P. (2001). *Foundry Technology*. (2nd Edition), United Kingdom, Butterworth-Heinemann.
- DIONICIO, E., VEGA, V., TABUCHI, E., GONZÁLES, O., ROSARIO, S., VILLACORTA, L., DIONICIO, N. (2004). Influencia del Molde y el Tratamiento Térmico en las

- Propiedades del Bronce-Aluminio. Revista del Instituto de Investigación FIGMMG (UNMSM, Perú), 17 (14); pp. 23-32.
- EXPÓSITO, J. (2013). Arenas de Sílice: Materia Prima Básica en la Industria de la Fundición (Parte 6). Revista FUNDIPress, (45); pp. 38-47. Recuperado el 17 de julio de 2014, de <http://pedeca.es/revistaonline/fundipress/45/>
- FOSECO FERROUS FOUNDRYMAN'S HANDBOOK. (2000). United Kingdom, Butterworth-Heinemann.
- GERIN, J. (1972). Cast Metals Technology. USA. Addison-Wesley Publishing Company.
- GRANLUND, M. J. (1999). Understanding the Basics of Green Sand Testing. Modern Casting. American Foundry Society, Inc.; pp. 38-40.
- GUNASEKARAN, A. & ANBALAGAN, G. (2007). Thermal Decomposition of Natural Dolomite. Bulletin of Materials Science, Vol. 30 (4); pp. 339-344.
- HEINE, R., LOPER, C., ROSENTHAL, P. (1967). Principles of Metals Casting. (2nd Edition). USA, McGraw-Hill Book Company.
- ILARDUYA Y CÍA. (2011). Productos para Fundición. Recuperado el 14 de mayo de 2014, de <http://www.ilarduya.com/arenas.htm>
- KLEIV, R. A. & THORNHILL, M., (2011). Dry Magnetic Separation of Olivine Sand. Physicochemical Problems of Mineral Processing, Vol. 47; pp. 213-228.
- LAMAS, V. & VALDERRAMA, L. (2006). Estudio de Factibilidad Técnica y Económica para Producir Arenas de Moldeo para Fundición Metalnorte. Revista de la Facultad de Ingeniería (UDA, Chile), Vol. 20; pp. 32-40.
- MCINTOSH, R. M., SHARP, J. H., WILBURN, F. W. (1990). The Thermal Decomposition of Dolomite. Thermochemical Acta, Vol. 165 (2); pp. 281-296.
- NOGUEZ, M. E., BELTRÁN, I., ROBERT, T., SALAS, G., RAMÍREZ, J. (2005). Influencia de la Formulación de la Arena en Verde en su Difusividad Térmica y su Efecto en una Pieza Colada. Revista de Metalurgia (CSIC, España), Vol. Extr.; pp. 143-147.
- QUINTERO, O. (2009). Principios de Tecnología de Fundición. Venezuela, Editorial Equinoccio.
- QUIPASUR. (2011). Productos. Fundición. Arenas especiales para fundición. Recuperado el 28 de julio de 2014, de <http://www.quipasur.cl/productos>
- SALCINES, C. & VALDES, A. (2000). Importancia de los Ensayos de Compactabilidad, Resistencia en Verde y Humedad en Mezclas de Moldeo. Revista de Ciencias de la Tierra: Minería y Geología (ISMM, Cuba), Vol. 17 (3-4); pp. 1-5.
- SERTUCHA, J. & SUÁREZ, R. (2005). Materiales Inorgánicos Aplicados en la Fabricación de Piezas de Fundición. Anales de la Real Sociedad Española de Química; pp. 17-27.
- SHAHRABI, B. K., MEHRABI, B., DABIRI, R. (2009). Thermal Behavior of Zefreh Dolomite Mine (Central Iran). Journal of Mining and Metallurgy, 45 B (1); pp. 35-44.
- SOCIEDAD NORTE-AMERICANA DE FUNDIDORES. COMITÉ DE ARENAS PARA MOLDEO 4-M (1994). Regresando a lo Básico: Fundamentos en Arena Verde. USA. AFS.
- SOCIETY FOR MINING, METALLURGY AND EXPLORATION. (2006). Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets, and Uses. (7th Edition), USA, SME.
- STROBL, S. M. (2000). Fundamentos en la Preparación y Control de la Arena Verde. Modern Casting, FundiExpo 2000; pp. 5-8. Recuperado el 14 de julio de 2014, de <http://www.simpsongroup.com/tech>
- TARTERA, J. (2014). Componentes de las Arenas de Moldeo (Parte 3). Revista FUNDIPress, (55); pp. 38-43. Recuperado el 18 de julio de 2014, de <http://pedeca.es/revistaonline/fundipress/55/>

