

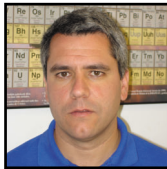
# MATERIALES INORGÁNICOS APLICADOS EN LA FABRICACIÓN DE PIEZAS DE FUNDICIÓN

## INTRODUCCION

Las técnicas de fabricación de piezas fundidas han sido un arte transmitido de generación en generación hasta hace relativamente pocos años. Sin embargo, las crecientes exigencias y requerimientos en cuanto a las propiedades tecnológicas de los materiales fabricados han supuesto la aplicación generalizada de métodos científicos con el fin de optimizar los procesos de producción y garantizar el control de las características de las piezas obtenidas.

Actualmente, las piezas de fundición de hierro representan una parte muy importante en el desarrollo de numerosos sectores como son la automoción, máquina herramienta, generadores eólicos, componentes hidráulicos, etc. Por ello, el sector trabaja de manera continua en la mejora del conocimiento de cada una de las etapas que componen el proceso de fabricación, a la vez que se aplican metodologías tecnológicamente innovadoras. Esta labor debe repercutir masivamente en la minimización de las piezas defectuosas y la reducción efectiva de los costes del proceso. En esencia, el proceso de fundición es muy sencillo, consiste en conformar una huella en dos semimoldes de arena que al unirse permiten definir una cavidad exactamente igual a la pieza que se desea obtener. Para ello, se requiere disponer de un modelo que es una réplica de la pieza y se puede utilizar tantas veces como sea necesario si es convenientemente utilizado, manipulado y conservado.

Cuando se afronta la fabricación de piezas con importantes dificultades morfológicas (por ejemplo, los huecos internos presentes en bloques de motor), es necesario utilizar elementos auxiliares denominados machos, los cuales se fabrican con arenas minerales aglomeradas químicamente. La utilización de estos elementos supone un importante esfuerzo de diseño y ensamblaje en el interior de los moldes con el fin de reducir las operaciones de proceso [Granlund, 1999a; Sertucha y Suárez, 2004]. Una vez construido el molde de arena, éste se llena con el metal fundido a través de unos conductos bien definidos en el mismo que se conocen con el nombre de bebederos, canales de distribución y ataques de colada. Tras introducir el metal



Jon Sertucha

Centro de Fundición AZTERLAN,  
Saibigain 10,  
E-48200 Durango, Bizkaia.  
E-mail: [jsertucha@azterlan.es](mailto:jsertucha@azterlan.es)



Ramón Suárez

líquido, es decir, colada la pieza, se requiere dar tiempo al proceso de solidificación para poder desmoldarla. Es importante conseguir el desmoldamiento eficaz del molde de forma que la pieza pueda separarse fácilmente de la arena que la rodea y aumentar así la productividad del proceso de fabricación.

De este modo, la elaboración de los moldes y machos es uno de los principales elementos dentro del proceso de fabricación de piezas fundidas y sus propiedades dependen, en gran medida, de las características de la arena utilizada en las operaciones de moldeo (elaboración de los moldes) y posterior colada [Granlund, 1999b]. Teniendo en cuenta todo ello, no es posible utilizar cualquier tipo de arena para su aplicación en fundición, se deben cumplir una serie de requerimientos entre los que se pueden destacar:

- Ser fácilmente moldeable, de manera que se adapte perfectamente a las formas del modelo y las reproduzca fielmente.
- Presentar una buena resistencia a la erosión producida por el desplazamiento y el impacto del metal líquido en el interior del molde.
- Resistencia a los ataques químicos que pueden producirse entre el molde y el metal líquido.
- Refractariedad, es decir, ofrecer una adecuada resistencia a las altas temperaturas.
- Poseer buena permeabilidad para permitir la evacuación de los gases que se generan durante la colada del molde y del aire que ocupa inicialmente la cavidad.
- Buena capacidad para disipar la energía térmica del metal líquido y favorecer así la correcta solidificación de las piezas.
- Ser colapsable, es decir, presentar una buena capacidad de disgregación.
- Generar buenos acabados superficiales en las piezas.
- Ser reutilizable, de manera que una vez regenerada pueda moldearse nuevamente.

Existen diversas técnicas de moldeo que utilizan arena en su proceso, sin embargo, la más utilizada en el mundo es la de moldeo en *verde*. Antiguamente los moldes de arena se secaban en estufas después del

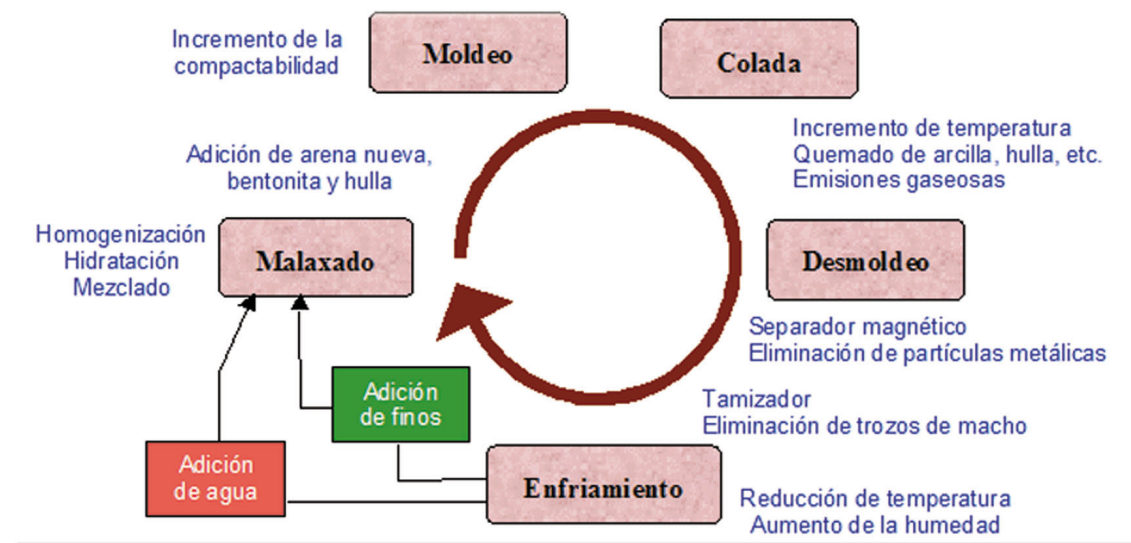


Figura 1. Ciclo general de la arena en un proceso de fundición.

desmodelado (separación molde-modelo), eliminando por completo el agua. Posteriormente, se empezaron a utilizar los moldes sin el proceso de secado, de ahí la denominación de técnica de moldeo en verde. Para poder conseguir las propiedades deseadas, es necesario cohesionar los granos de arena con ayuda de sustancias que ejerzan esta función. Por otro lado, es necesario mantener aislada la superficie de los moldes con el fin de evitar reacciones con el metal fundido. Como consecuencia de ello, las mezclas de arena en verde utilizadas en fundición están constituidas por los siguientes materiales:

- Arena lavada, generalmente constituidas por granos de sílice (~80%).
- Material aglutinante, una arcilla cuya misión es unir los granos de sílice (9-10%).
- Agua, cuyo objetivo es activar la función de la arcilla (3-4%).
- Materiales carbonosos (4-6%). Este constituyente se sustituye por otros aditivos en el caso de la fabricación de piezas de acero para evitar recarburaciones del metal.

En el caso del moldeo químico y la fabricación de machos, las mezclas de arena están constituidas por la arena base (99-98%) aglomerada con resinas químicas de diversa índole (1-2%). Como primer paso en la elaboración del molde, es necesario seleccionar los materiales adecuados en función del tipo de aleación que se desee colar y del método de moldeo elegido. Seguidamente, los materiales se deben mezclar de manera adecuada obteniéndose un producto apto para el moldeo (compactación de la arena) y la posterior fabricación de las piezas.

En general, la fabricación de piezas de gran tamaño (entre 10 y 15 t) requiere la utilización de moldes con elevadas resistencias durante la colada. Un caso similar ocurre con los machos, los cuales habitualmente configu-

ran secciones estrechas y formas complejas. En estos casos, los granos de arena se aglomeran con resinas químicas que, tras el posterior fraguado, confieren alta dureza y resistencia a los sistemas compactados. Sin embargo, en la gran mayoría de los casos los moldes utilizados en fundición se fabrican con mezclas de arena aglutinadas con arcillas minerales [Heine y Florey, 2001] debido al menor coste e impacto ambiental del proceso.

Las propiedades físicas de las mezclas de arena utilizadas en la fabricación de moldes pueden ser controladas a través de ensayos de laboratorio [Sertucha y Suárez, 2004]. Sin embargo, estas características no sólo son consecuencia del tipo de materiales utilizados, es decir, el tipo de arena, las características del aglutinante, etc. El proceso de mezcla (tiempo y método de malaxado o mezclado) y el tipo de proceso de fabricación (relación arena-metal, tipo de aleación metálica colada en los moldes, regeneración de la arena mediante el aporte de machos y/o arena nueva, efectividad de los sistemas de reacondicionamiento de la arena usada, etc.) son aspectos también muy importantes en el comportamiento de los moldes durante la colada [Shih y Zong, 1999]. De este modo, las mezclas de arena inciden directamente en la calidad de las piezas, tanto como el metal utilizado [Granlund, 1999b]. En cualquier caso, se trata de materiales necesariamente reutilizables en el circuito de fabricación, por lo que el conocimiento y el control de las características de las mezclas de arena, antes y después de la fabricación de las piezas, es un aspecto fundamental a la hora de optimizar los procesos industriales de fundición. La **Figura 1** muestra las diferentes etapas por las que pasan las mezclas de arena dentro de un proceso de fabricación [Pickrell et al., 1999].

Aunque en la elaboración de las mezclas de arena para moldeo en verde intervienen al menos cuatro tipos diferentes de materiales, en este trabajo se analizan las características de los dos componentes inorgánicos

**Tabla 1.** Propiedades físicas pertenecientes a las arenas utilizadas en fundición.

Tipo de arena	Sílice	Cromita	Zirconio	Olivino
Composición	SiO <sub>2</sub>	(Fe,Mg)Cr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	ZrSiO <sub>4</sub> -ZrO <sub>2</sub>	(Mg,Fe) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
pH	5,5-8,5	7,0-9,5	5,7-6,4	9,2-9,5
d <sub>aparente</sub> (g/ml)	1,5-1,6	2,6-2,7	2,7-2,8	1,7
d <sub>material</sub> (g/ml)	2,65-2,67	4,30-4,60	3,90-4,80	3,27-3,37
T <sub>fusión</sub> (°C)	1713	2090	2540	1870
T <sub>sinterización</sub> (°C)	> 1400	1400	1400	1375
Expansión, 20-1200°C (%)	1,90	0,60	0,45	1,10
P. calcinación (%)	0,05-0,30	0,02	0,10	1,35
Ce (cal/g°C)	0,26	0,22	0,13	0,22
Difusividad δ (K/Cp)	6,7	9,3	28,4	17,4

más importantes, es decir, la arena base y el aglutinante mineral que es activado con la humedad adecuada. En el moldeo químico y/o la fabricación de machos, la concentración de la arena base es aún mayor en las mezclas, por lo que sus propiedades son más determinantes si cabe en las características de los moldes preparados.

## 2. TIPOS DE ARENA UTILIZADOS EN FUNDICIÓN

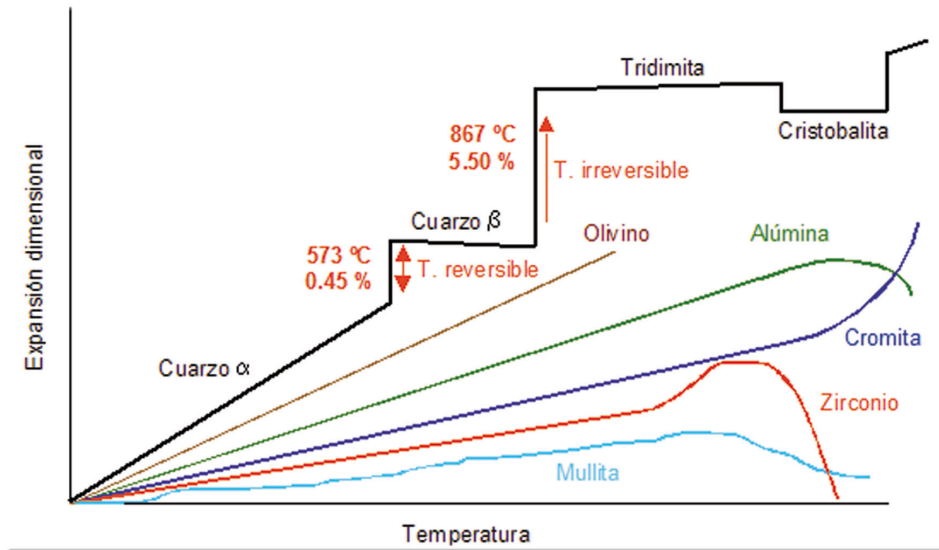
El principal motivo por el que se utilizan arenas minerales en la fabricación de los moldes de fundición es el carácter refractario de estos materiales. Es necesario emplear un material que resista las altas temperaturas de colada del metal líquido sin que ello suponga modificaciones físico-químicas tanto en los moldes como en las piezas finalmente obtenidas tras la solidificación. Por otra parte, la utilización de moldes de arena permite, entre otros aspectos ya mencionados, minimizar el tiempo destinado a las operaciones de desmoldeo, es decir, la separación de las piezas ya sólidas y los moldes que las rodean.

Dado que las mezclas de arena para moldeo están constituidas en su gran mayoría por la arena base (aproximadamente el 80%), las propiedades físicas y químicas de dicho material definen principalmente las características de los moldes utilizados. En este punto, es necesario recordar que se trata de un material heterogéneo, es decir, las arenas no constituyen una materia continua sino un empaquetamiento de granos con diferentes formas y tamaños, por lo que su morfología física adquiere una relevancia especial [Brümmer, 2001]. Existe una gran diversidad de arenas con aplicación en el moldeo de fundición que cumplen en mayor o menor medida las exigencias básicas expresadas en la introducción. Lógicamente, dentro de esta gran variedad unas tienen mayor aceptación o una utilización más extensiva, mientras que otras son excelentes para aplicaciones específicas y por tanto más

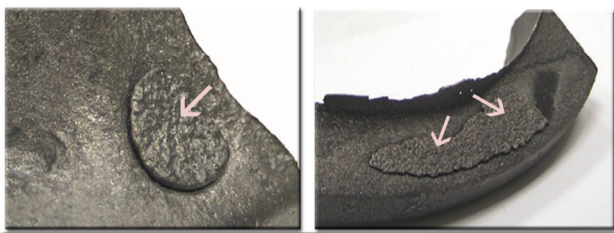
restringidas. En la **Tabla 1** se resumen algunas características de las arenas utilizadas habitualmente en fundición [Sertucha y Suárez, 2004].

Aunque comercialmente se dispone de otros tipos de arenas tanto minerales como sintéticas, las incluidas en la **Tabla 1** se pueden considerar como las habituales en los procesos de fundición. Concretamente, la arena de sílice es la de mayor implantación en el moldeo de piezas de fundición. A pesar de que sus características no son las que mejor responden a las exigencias del moldeo, su bajo coste y gran abundancia la convierten en la más utilizada. Además, posee otras características que la hacen muy interesante como son su elevado poder de compactación y la gran disponibilidad en cuanto a tamaños y/o distribuciones de grano. La utilización de otros tipos de arena que no sea la de sílice está normalmente asociada a la presencia de defectos en las piezas. Estas irregularidades son consecuencia tanto de las características de la sílice (especialmente su alta expansión y baja difusividad térmicas) como de la naturaleza del metal colado en los moldes. En este segundo caso, se puede destacar la capacidad de contracción del material a lo largo de la solidificación (formación de rechupes) y las reacciones molde-metal (la sílice reacciona fácilmente con aceros de alto contenido en manganeso, por lo que en estos casos se suele utilizar la arena de olivino -[Mg,Fe]<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>-).

En la **Figura 2**, se comparan de forma esquemática las curvas de dilatación térmica en varios materiales que componen algunas de las arenas utilizadas en fundición. El comportamiento mostrado por la sílice indica la presencia inicial de una transición de fase sólido-sólido entre las fases cuarzo α y β, seguida por un segundo cambio de fase, donde se origina la tridimita -SiO<sub>2</sub>- como fase estable de alta temperatura. Estas transformaciones estructurales en la sílice implican expansiones bruscas en el material, aspecto que no ocurre en



**Figura 2.** Expansión dimensional en materiales constitutivos de las arenas utilizadas en fundición.



**Figura 3.** Defectos provocados por la expansión de los granos de sílice (darts).

el resto de minerales analizados. Este hecho supone que los granos que componen la arena de sílice pueden originar roturas en los moldes y, consecuentemente, defectos en las piezas (**Figura 3**) [Meehanite, 1978]. Para evitar la utilización de arenas alternativas más caras y eliminar los defectos provocados por la expansión térmica de la sílice, es necesario crear un "colchón" que rodee los granos utilizando los materiales necesarios para dotar a las mezclas de características aptas para el moldeo (arcilla aglutinante, agua y materiales carbonosos).

Otra de las razones principales para la utilización de arenas diferentes a la de sílice es la necesidad de disipar más rápidamente el calor del metal colado en los moldes. Las velocidades de solidificación de las piezas dependen tanto de su masa como de la conductividad térmica de la arena que constituye el molde. Una solidificación lenta aumenta el poder de contracción del metal y, en determinadas ocasiones, favorece la formación de discontinuidades conocidas como "rechupes". Estos defectos pueden invalidar las piezas fabricadas y, entre otros problemas, incrementar los costes de proceso. Las arenas con mayor capacidad para disipar el calor generado por la colada actúan de sistemas "enfriadores" que ayudan a minimizar los efectos de contracción del metal y los defectos que de ello se derivan. La arena de cromita  $-(Fe,Mg)Cr_2O_4-$  es la más utilizada en este sentido, tanto en la fabricación de machos como de moldes. Sin embargo, su elevada densidad y su poder contaminante desaconseja su utilización,

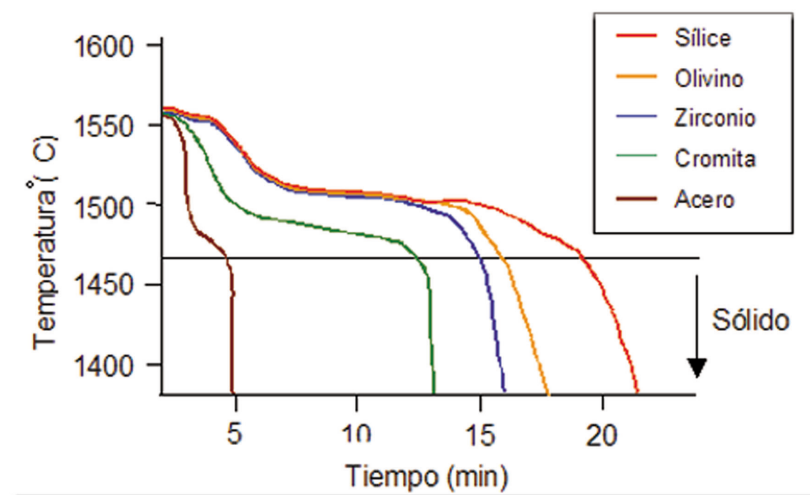
salvo en casos muy especiales. En la **Figura 4** se comparan las curvas térmicas de solidificación pertenecientes a una esfera de acero líquido colada en moldes fabricados con diferentes tipos de arena aglomerada químicamente.

Los materiales con más facilidad para difundir el calor del metal colado originan curvas de solidificación más cortas en el tiempo. Lógicamente, el molde metálico es el que consigue enfriar más rápidamente el metal líquido colado en su interior. En este caso, las técnicas de análisis térmico permiten evaluar la conductividad térmica de los moldes durante la solidificación y posterior enfriamiento del metal y, por tanto, de las piezas fabricadas. Independientemente de la naturaleza química de la arena, existen otros factores morfológicos que juegan un papel crucial en las propiedades de los moldes: la forma, tamaño y distribución de los granos que forman parte de dichos sistemas. Puesto que una arena de moldeo es un material compactado y heterogéneo, sus propiedades físicas y tecnológicas no se corresponden propiamente con las de la sílice. Por ello, es necesario tener muy en cuenta las características morfológicas de las unidades estructurales que la componen (granos). Adicionalmente, el grado de compactación o empaquetamiento alcanzado también debe ser considerado a la hora de fabricar moldes aptos para la colada del metal líquido.

En este caso, son tres los factores morfológicos que afectan al tipo de grano presente en las arenas de fundición: la forma, el tamaño y la distribución. La **Figura 5** muestra una clasificación de los granos atendiendo tanto a su redondez como a la esfericidad requeridas desde un punto de vista industrial [Sertucha y Suárez, 2004]. Sin embargo, y a efectos prácticos, habitualmente las arenas se clasifican en "redondeadas" y/o "angulares".

La caracterización de las arenas en función del tamaño y la distribución de sus granos llevan a definir el denominado "índice AFS". Se trata de un parámetro que

Figura 4. Análisis comparativo de los procesos de solidificación y enfriamiento en diferentes arenas.



Esfericidad ↓	Muy angular	Angular	Subangular	Redondeada	Redonda	
0,9						Muy esférica
0,7						Esférica
0,5						Semiesférica
0,3						Poco esférica
Redondez →	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	

Figura 5. Clasificación de los granos de arena en base a su morfología externa.

determina el tamaño medio de los granos en función de su tamaño y el número de éstos. Para ello, las muestras de arena deben ser sometidas a una clasificación granulométrica en el laboratorio con ayuda de una columna de tamices con diferentes tamaños de abertura. Teniendo en cuenta la masa de arena total ( $M_{total}$ ) y la que queda en cada uno de estos tamices ( $M_{tamiz}$ ), es posible calcular el índice AFS según la expresión (1):

$$\text{Índice AFS} = \sum(M_{tamiz} \times F/M_{total}) \quad (1)$$

El factor F representa el número de aberturas por pulgada lineal que existe en cada tamiz utilizado en la caracterización de la arena. De este modo, el índice AFS representa el valor medio ponderado de este factor para un tamiz hipotético, cuyo tamaño de abertura en la malla sería igual al tamaño medio de grano de la arena analizada. Además de la caracterización morfológica de las arenas base, existe una serie de parámetros de control utilizados habitualmente por los proveedores de arenas de fundición y que deben acompañar a cada lote empleado en la fabricación de las mezclas para el moldeo. Estos controles son imprescindibles para el fundidor y, en numerosas ocasiones, son útiles para detectar el

origen de determinados defectos aparecidos en las piezas fabricadas. Los más importantes son los siguientes:

- Contenido en agua (humedad de la arena).
- Composición química (fundamentalmente los contenidos de  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$  y  $MgO$ ).
- Pérdidas por calcinación (contenido en materiales combustibles).
- Punto de sinterización (estabilidad térmica de los granos).
- Demanda de ácido (capacidad para reaccionar con sustancias ácidas).
- pH.

Los dos últimos parámetros son especialmente importantes en el caso de las mezclas de arena aglomeradas químicamente. En estos casos, pueden producirse reacciones entre la superficie de los granos y las resinas químicas que los envuelven o los productos catalizadores utilizados para el fraguado final de las mezclas. La desactivación de cualquiera de estas sustancias anula sus funciones y por tanto se pierden las propiedades de los moldes. En la **Tabla 2** se especifican algunos de los requerimientos establecidos en varias arenas comer-

Tabla 2. Características en algunos tipos de arenas comerciales.

Característica	Tipo de arena				
	L50-60	C55	L80-90	L105-115	Cromita
Apariencia	Color amarillento y sin grumos (sílice)				Negra y brillante
Forma de los granos	subangular	redondeada	subangular	subangular	angular
Humedad (%)	< 0,05				< 0,2
Índice AFS	48-60	51-61	77-92	95-115	45-65
Granulometría (%)					
> 0,500 mm	≤ 9	≤ 5	≤ 6	≤ 8	≤ 2
0,500-0,125 mm	≥ 87,0	≥ 90,5	≥ 84,0	≥ 89,0	≥ 92,0
< 0,125 mm	≤ 6,5	1,5-4,5	≤ 2,5	≤ 5,0	≤ 5,0
< 20 μm	≤ 0,7	≤ 0,4	≤ 0,9	≤ 0,9	≤ 0,5
Demanda de ácido (ml/100 g)	≤ 6	≤ 5	≤ 6	≤ 6	—
pH	5-6				7-9
Punto de sinterización (°C)	≤ 1500	≤ 1450	≤ 1500	≤ 1500	—
Análisis químico (%)					
SiO <sub>2</sub>	≥ 99,0	≥ 98,0	≥ 98,5	≥ 98,5	≤ 1,5
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					44-48
FeO					23-28

ciales de sílice y cromita. Es tarea del fundidor comprobar que la arena utilizada se ajusta a los requerimientos de su proceso de producción y vigilar la evolución de las características de este material en cada lote suministrado.

### 3. AGLUTINANTES ARCILLOSOS

Aunque se trata del material mayoritario e imprescindible en las arenas de moldeo, la arena base por sí sola no es útil industrialmente. Es necesario unir o aglutinar los granos con una sustancia que ejerce las funciones de "cemento", para poder conformar los moldes donde se colará posteriormente el metal líquido. La eficacia de este aglutinante influye directamente en las fuerzas de cohesión que mantienen unidos los granos tras el proceso de compactación y, por tanto, en la dureza y resistencia de los moldes fabricados [Shih y Zong, 1999]. En las arenas de moldeo químico, son las resinas químicas (o en algún caso sales binarias como el silicato de sodio) las que ejercen la función de unir los granos cuando se mezclan con los productos catalizadores o endurecedores. En estos casos, se habla de "productos aglomerantes" y "mezclas aglomeradas químicamente". En el caso de las arenas de moldeo en verde (las más utilizadas en los procesos de fundición), la cohesión de los granos de arena se lleva a cabo con ayuda de una arcilla mineral mezclada con una determinada cantidad de agua [Ripke y Kawatra, 2000]. En este sentido, la eficacia del proceso de malaxado y la obtención de un grado de humedad adecuado al finalizar la preparación de las mezclas son factores críticos a la hora de recubrir de manera satisfactoria los granos, desarrollar adecuadamente las propiedades de las arenas de moldeo en verde y, por tanto, las características de los moldes.

Las arcillas se consideran silicatos de aluminio, pudiendo aparecer en su composición pequeñas cantidades de otros elementos (principalmente magnesio, hierro, potasio, sodio y calcio). La estructura cristalina de estos materiales se conoce desde hace relativamente poco tiempo gracias a los estudios realizados con ayuda de la difracción de rayos X y la microscopía electrónica. Sin embargo, los yacimientos de arcillas están constituidos por diversas especies de minerales arcillosos que corresponden a la misma época geológica de formación, junto con las impurezas. Un buen yacimiento de arcilla se caracteriza por el predominio de una sola especie mineral y por su pureza. La composición de los yacimientos suele ser muy variable y cambia de un depósito a otro. Incluso dentro del mismo depósito existen grandes diferencias de composición entre los distintos estratos.

#### 3.1. Estructura química de las diferentes arcillas

Las propiedades de una arcilla están directamente relacionadas con las características estructurales de los cristales pertenecientes al constituyente principal de la misma. Estos cristales tienen una morfología laminar, por lo que cuentan con una gran superficie en relación a su masa. Sus dimensiones estructurales varían en función del tipo de arcilla, si bien sus longitudes suelen ser inferiores a 2 μm y sus espesores aproximadamente de 0,05 μm. Las redes cristalinas se forman por el apilamiento de delgadísimas láminas dispuestas paralelamente entre sí. De este modo, se origina una estructura capaz de deslizarse en condiciones adecuadas de humedad y permite desarrollar las propiedades aglutinantes útiles en los procesos industriales de fundición. Cada uno de estos cristales (o láminas cristalinas) está

constituido por agrupaciones tridimensionales de átomos de silicio, aluminio, oxígeno, hidrógeno y en menor cantidad de magnesio o hierro, dispuestos según una determinada simetría, dando lugar a dos tipos de capas cristalinas. En las arcillas, estas capas se unen unas con otras formando bicapas o tricapas que, a su vez, se disponen paralelamente entre sí dejando espacios donde pueden introducirse otras sustancias químicas (moléculas de agua, iones metálicos, etc.). Estas disposiciones paralelas generan las láminas que constituyen el cristal macroscópico de una arcilla [Sertucha y Suárez, 2004; Ripke y Kawatra, 2000].

Existen dos tipos de capas cristalinas bien definidos (**A** y **B**) en función del tipo de átomos que las constituyen. Las distintas combinaciones de estas capas son las que originan los diferentes constituyentes de las arcillas. Los dos tipos anteriormente mencionados son los siguientes:

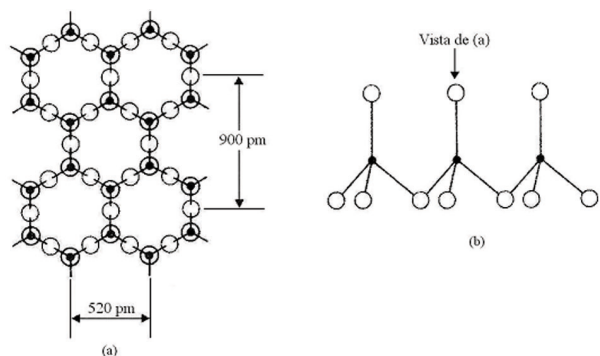
Capas de tipo **A**: constituidas por iones  $O^{2-}$  que se disponen tetraédricamente alrededor de los cationes  $Si(IV)$  (**Figura 6**).

Capas de tipo **B**: constituidas por ligandos  $O^{2-}$  y  $OH^-$  que se encuentran unidos a los cationes  $Al^{3+}$  en una coordinación octaédrica.

En ambos tipos de capas el balance de cargas es neutro. Sin embargo, en ellas se producen sustituciones isomorfas parciales de cationes  $Al^{3+}$  por  $Mg^{2+}$  o  $Fe^{2+}$ , por lo que se desequilibra este balance electrostático en la capa de tipo **B**. Lo mismo puede suceder en el caso de la sustitución del  $Si(IV)$  por  $Al^{3+}$  en el caso de las capas de tipo **A**. De esta forma, en los dos casos aparece una carga negativa global sobre la superficie exterior de estas capas.

Las capas contienen iones  $O^{2-}$  (tipo **A**) o bien  $OH^-$  (tipo **B**) no compartidos, situados en su superficie y disponibles para la unión con otra u otras capas cristalinas adyacentes. En la naturaleza existen dos formas en las que puede tener lugar esta unión:

**Forma 1**: como resultado se obtiene una bicapa **AB** y es consecuencia de la unión paralela entre una capa de tipo **A** y otra de tipo **B**.



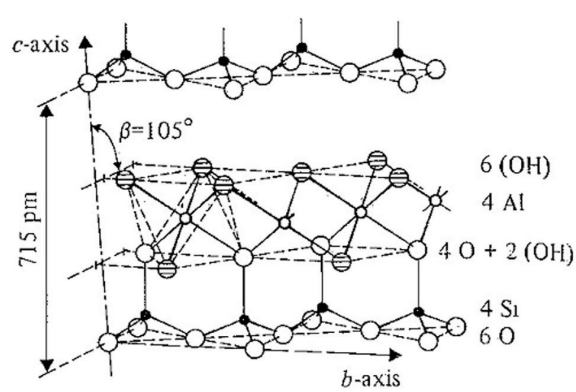
**Figura 6.** Capa de tipo A, constituida por tetraedros  $\{SiO_4\}$  en los que se comparten ligandos  $O^{2-}$ .

**Forma 2**: en este caso se obtiene una tricapa **ABA** como resultado de la unión paralela de dos capas de tipo **A** con una de tipo **B** situada entre ambas.

En cualquier caso, estas agrupaciones de capas siguen teniendo una carga total negativa en su superficie exterior, debido a la sustitución parcial de los cationes  $Al^{3+}$  y/o  $Si(IV)$  situados en los centros de coordinación octaédrica y/o tetraédrica. Teniendo en cuenta las posibilidades de unión entre las capas estructurales, existen fundamentalmente tres grupos de minerales arcillosos: los *Caoliníticos*, los *Montmorilloníticos* (también llamadas bentonitas) y los *Illíticos* (micas). Es muy habitual que las arcillas de estos grupos vayan acompañadas con impurezas de otros minerales (cuarzo, sílice, feldespato, óxidos de hierro, carbonatos, sulfatos, materia orgánica, etc.). Para poder comprender mejor las propiedades de cada una de estas arcillas es necesario examinar sus estructuras cristalinas. Por lo general, en las fórmulas que representan la composición de estos materiales no figuran elementos existentes en muy pequeñas proporciones, aunque a veces su presencia es suficiente para cambiar las propiedades físicas y químicas del material cristalino.

### 3.1.1. La caolinita

Se trata de un grupo de arcillas cuya composición química está basada en la fórmula  $[Al_2(OH)_4Si_2O_5]$ . Los cristales de la caolinita están formados por finísimas láminas hexagonales y asimétricas, cuya estructura cristalina corresponde a un apilamiento paralelo e infinito de bicapas de tipo **AB**. Una representación esquemática de la estructura cristalina en la caolinita se presenta en la **Figura 7**. La unión entre estas bicapas se produce mediante enlaces de hidrógeno del tipo  $O \cdots H-O$ , que se establecen entre los iones  $O^{2-}$  situados en la superficie de una bicapa y los iones  $OH^-$  que se sitúan en la superficie de la bicapa adyacente. Este tipo de enlaces es lo suficientemente fuerte para impedir que las láminas cristalinas de la caolinita se puedan dilatar y permitir la entrada de moléculas de agua en su interior. Por esa razón, las arcillas caoliníticas apenas reaccionan hinchándose en presencia de un medio



**Figura 7.** Disposición de las bicapas cristalinas AB en la estructura de la caolinita.

acuoso y su aplicación como aglutinante de las arenas de moldeo no se considera óptima.

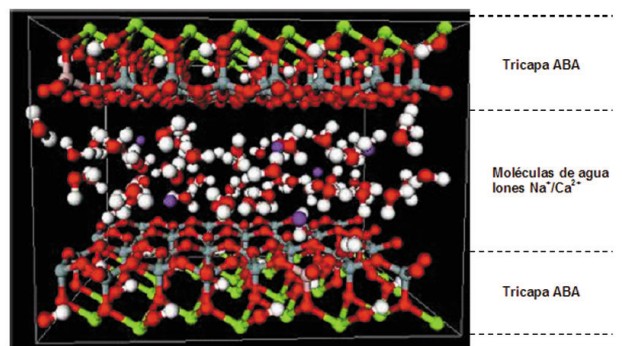
### 3.1.2. La montmorillonita

De todas las arcillas disponibles en la naturaleza, la montmorillonita destaca ampliamente por su capacidad para cohesionar los granos de arena, aportando la plasticidad adecuada a las mezclas en las operaciones de moldeo (incluso después de la colada). Este grupo de arcillas puede representarse mediante la siguiente fórmula química  $[Na_{0,33}Mg_{0,33}Al_{1,67}(OH)_2Si_4O_{10}]$ , aunque la proporción de aluminio, magnesio e incluso hierro varía en función del origen y el tipo de depósito arcilloso. La estructura cristalina de la montmorillonita está constituida por tricapas de tipo **ABA**, que se disponen paralelamente unas con otras dando lugar a un apilamiento infinito. La **Figura 8** muestra la agrupación de los iones en este tipo de arcillas tan útiles en la fabricación de moldes de fundición. En este caso, las tricapas cristalinas se disponen en el espacio de manera que las capas de tipo **A** están siempre frente a otra también de tipo **A** y perteneciente a la unidad adyacente. Por ello, las fuerzas de unión que se establecen entre estas tricapas tienen lugar únicamente entre los iones  $O^{2-}$ . Estas fuerzas de atracción (tipo Van der Waals) son mucho más débiles que los enlaces de hidrógeno presentes en la caolinita. Por ello, en presencia de un medio acuoso, la montmorillonita es capaz de hincharse y permitir que las moléculas de agua se introduzcan entre las tricapas que forman láminas cristalinas. Esta propiedad de las arcillas montmorilloníticas permite rentabilizar su utilización en las arenas en verde ya que se necesitan menores esfuerzos de mezcla.

Con objeto de mantener la neutralidad de cargas en el conjunto cristalino, entre las tricapas (cargadas negativamente en su superficie) aparecen siempre cationes (principalmente  $Na^+$  o  $Ca^{2+}$ , aunque también pequeñas cantidades de  $Mg^{2+}$ ) que influyen decisivamente en la capacidad que tiene este tipo de arcillas para absorber las moléculas de agua (**Figura 9**). Estos iones son intercambiables debido a que se encuentran unidos muy débilmente al plano basal formado por los iones  $O^{2-}$  (superficies exteriores de las tricapas **ABA**).

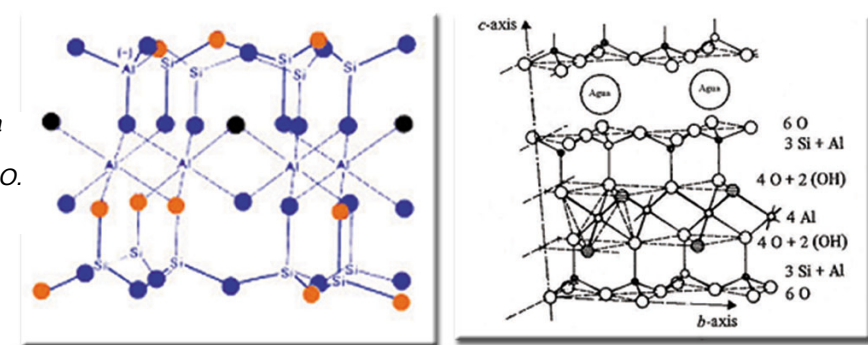
La gran avidez por el agua que muestra la montmorillonita está relacionada con la necesidad de mantener el

sodio y/o el calcio en forma de iones hidratados (eléctricamente positivos) entre las tricapas **ABA** y conseguir así la condición de neutralidad eléctrica del conjunto arcilloso. Se ha mencionado ya que la capacidad de hidratación de la montmorillonita está ampliamente condicionada por la presencia de uno u otro ión intercambiable entre las tricapas **ABA** [Heine y Green, 1992]. De hecho, el volumen de agua (número de capas formadas por moléculas de agua) que puede absorber este tipo de arcillas está condicionado por las características de la esfera de hidratación perteneciente a estos cationes intercambiables. Por ejemplo, un parámetro de control de las arenas de moldeo como es la *resistencia a la compresión en verde* (máximo valor de esfuerzo de compresión longitudinal que puede soportar la mezcla de arena antes de romperse) es diferente en una arena de moldeo preparada con montmorillonita sódica frente a una que contiene la variedad cálcica, debido a los distintos efectos que estos cationes tienen sobre la disposición y la rigidez de las capas de agua que se absorben en los cristales pertenecientes a la arcilla. Se ha comprobado que el máximo valor de resistencia a la compresión en verde para la montmorillonita sódica tiene lugar cuando hay tres capas de moléculas de agua por celda unidad del compuesto. En el caso de la montmorillonita cálcica el máximo valor se alcanza cuando existen cuatro capas de agua por unidad del compuesto. Comparativamente, la resistencia a la compresión en verde es mayor en la variedad cálcica debido a que los iones  $Ca^{2+}$  y sus esferas de hidratación dan lugar a un mayor número de capas rígidas, formadas por moléculas de agua que han sido absorbidas por la arcilla y, por tanto, dan lugar a uniones más fuertes entre las partículas constituyentes.

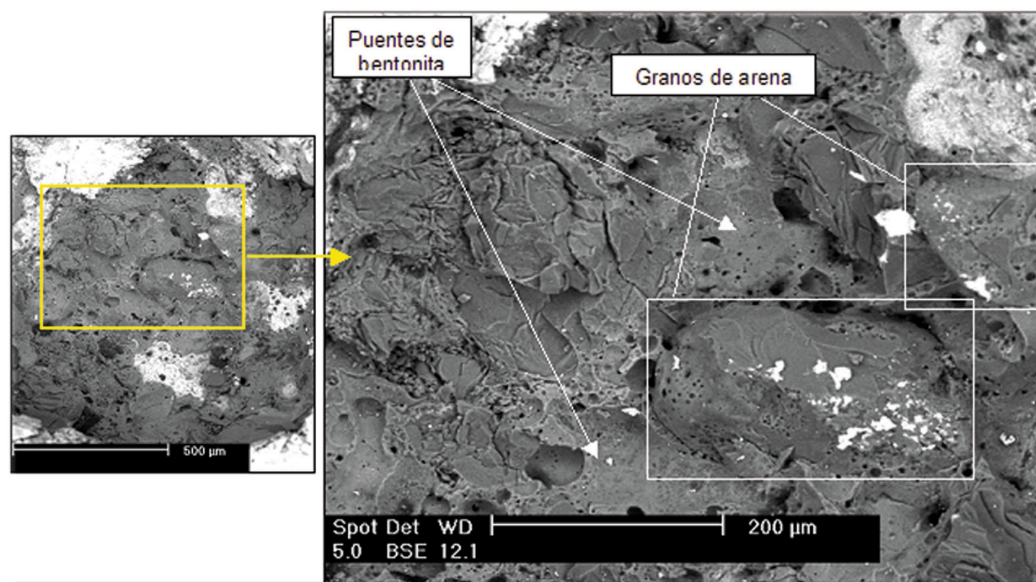


**Figura 9.** Disposición de las moléculas de agua y iones  $Na^+$  y/o  $Ca^{2+}$  entre las tricapas **ABA**.

**Figura 8.** Estructura cristalina de la montmorillonita hidratada  $[Na_{0,33}Mg_{0,33}Al_{1,67}(OH)_2Si_4O_{10}] \cdot xH_2O$ .







**Figura 10.** Granos de arena aglutinados con la mezcla de bentonita y agua.

La mayor aplicabilidad de las arcillas en la industria de fundición se encuentra en mezclas de arcillas montmorilloníticas (al menos del 75% de concentración), designadas habitualmente con el nombre de bentonitas, que contienen cantidades minoritarias de otros tipos de arcillas y/o impurezas minerales. Las mejores propiedades de aglutinación se han detectado en las llamadas bentonitas sódicas activadas, en las que los iones  $\text{Ca}^{2+}$  se sustituyen por  $\text{Na}^{+}$  a través de un proceso químico de activación. Este proceso supone la adición de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  sólido sobre el mineral con una determinada granulometría y humedad. La misión fundamental de la bentonita es conseguir que los moldes de arena alcancen la compactación necesaria para resistir el ataque del metal durante la colada. A la hora de seleccionar una bentonita también se deberá tener en cuenta su facilidad en el desmoldeo y la tendencia a formar grumos (dificultades en el mezclado de la arena). Por otro lado, la minimización del consumo de bentonita requiere utilizar aglutinantes con calidades adecuadas (con la mayor pureza posible) y cuyas propiedades térmicas permitan mantener sus características a lo largo de varias coladas.

### 3.1.3. La illita

La estructura cristalina en este tipo de arcillas es muy similar al caso de la montmorillonita, es decir, se trata de apilamientos de tricapas **ABA** cargadas negativamente con iones  $\text{K}^{+}$  situados entre ellas. La presencia de este catión provoca la formación de enlaces muy fuertes entre las tricapas, impidiendo la entrada de las moléculas de agua en los espacios situados entre éstas y perjudicando sus características aglutinantes. La fórmula química que representa este tercer grupo de arcillas viene dada por  $[\text{K}_2\text{Al}_4(\text{OH})_4(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{20}]$ .

## 3.2. Mecanismos de aglutinación

La utilización de las arcillas en la fundición está basada en las propiedades aglutinantes que presentan estos materiales cuando forman mezclas con el agua.

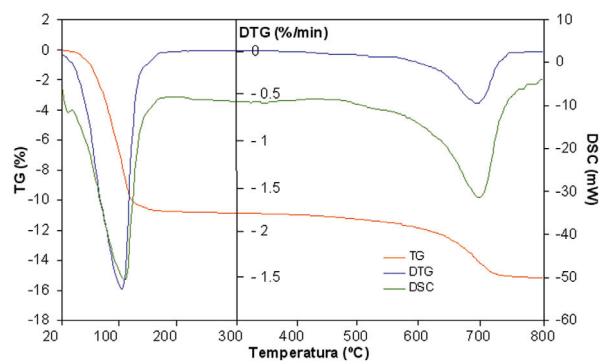
Anteriormente se ha visto cómo los cristales de las arcillas contienen cargas negativas en su superficie, por lo que las moléculas de agua (dipolos eléctricos) y los cationes forman finas películas alrededor de cada una de las partículas arcillosas y le dan a la mezcla cohesión, plasticidad y adhesión a otros materiales. Estas tres propiedades se pueden explicar desde un punto de vista estructural. La cohesión (o tendencia de las partículas a mantenerse unidas) está relacionada con la resistencia que generan las uniones electrostáticas cuando se produce un desplazamiento entre los cristales y/o partículas de la arcilla. La plasticidad se obtiene al aplicar sobre la mezcla una energía de amasado suficiente como para que las partículas de arcilla resbalen unas sobre otras, rompiéndose las uniones electrostáticas en unas posiciones y volviéndose a establecer en otras.

Por último, la adhesión sobre otros materiales es una propiedad fundamental de las mezclas arcilla-agua, ya que si aparece un objeto extraño (como es un grano de arena de sílice, por ejemplo) éste queda envuelto y unido a las partículas de la arcilla a través de las películas acuosas. En la **Figura 10** se puede observar la estructura microscópica de una arena de moldeo en verde. Alrededor de los granos de sílice aparece un revestimiento constituido por bentonita mezclada con agua.

Las propiedades aglutinantes de una arcilla vienen dadas por el tipo de constituyente predominante (la montmorillonita en el caso de las bentonitas) pero no por su capacidad para absorber agua o hinchamiento (la cual depende de la cantidad y naturaleza de los cationes retenidos entre las capas que forman los cristales de la arcilla).

## 3.3. Propiedades térmicas

Al contrario que las arenas utilizadas en la fundición, las arcillas aglutinantes son materiales que no soportan estructuralmente las temperaturas del hierro fundido



**Figura 11.** Proceso de descomposición térmica de una bentonita sódica natural.

(1350-1450 °C). Este hecho supone que las bentonitas se degradan por efecto de la temperatura, perdiendo así sus propiedades. Afortunadamente, este proceso de degradación depende exclusivamente de la temperatura en la mezcla de arena. Dado que el calor presente en el molde disminuye de manera importante al aumentar la distancia entre los granos y el metal colado, la cantidad de bentonita "quemada" por efecto del calor es realmente reducida (aproximadamente el 0,5-2,0%, dependiendo del tipo de proceso y las condiciones de fabricación). Esta es la razón por la que suelen ser necesarios pequeños aportes de bentonita cada vez que se prepara una nueva mezcla para moldeo. Por todo ello, resulta de especial interés conocer cuáles son las propiedades térmicas que muestran este tipo de arcillas. Incluso, muchos de los proveedores y clientes de estos materiales aglutinantes utilizan las técnicas de análisis térmico para comprobar la estabilidad estructural de las bentonitas que utilizan en los procesos de fabricación de los moldes de fundición.

Con este fin, se realizan análisis termogravimétricos sobre los tres principales tipos de bentonitas disponibles comercialmente: sódica natural, sódica activada con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y cálcica natural. La **Figura 11** muestra las curvas termogravimétricas TG, DTG y DSC obtenidas al introducir 37,5 mg de bentonita sódica natural (EE UU) *Volclay SPV-200*, en una termobalanza Setaram TG-DSC 111.

El análisis de las características de la curva DSC permite observar dos procesos endotérmicos asociados a pérdidas importantes de masa. Ambos procesos están representados por picos mínimos en la curva DSC y ocurren a temperaturas consideradas críticas en la

descomposición térmica de las bentonitas. El primer proceso térmico corresponde a la deshidratación de la bentonita, tiene lugar en el intervalo 20-165 °C ( $T_{\text{mín}} = 105$  °C en DTG) y está provocado por la evaporación de las moléculas de agua que rodean o se sitúan entre las capas cristalinas de la arcilla (humedad). En consecuencia, la pérdida de masa asociada a este proceso de deshidratación depende del contenido de moléculas de agua en la muestra. Entre 165 y 550 °C se obtiene de manera estable bentonita sódica anhidra. En el intervalo 550-750 °C ( $T_{\text{mín}} = 690$  °C en DTG) tiene lugar el segundo proceso endotérmico, el cual corresponde a una deshidroxilación o pérdida de los iones  $\text{OH}^-$  (hidroxilo) unidos a los cationes  $\text{Al}^{3+}$  y situados en las capas de tipo B que forman los cristales de la montmorillonita. Esta degradación produce un reordenamiento estructural irreversible al que se conoce comúnmente como quemado de la bentonita. La pérdida de masa obtenida en el proceso de deshidroxilación es independiente de la humedad inicial de la bentonita, siendo función únicamente de la naturaleza química (número y disposición) de los iones  $\text{OH}^-$  en las capas cristalinas que constituyen la arcilla. Las características de este segundo proceso de deshidratación se pueden utilizar para controlar la calidad de las bentonitas suministradas a la fundición.

En la **Tabla 3** se comparan las características termogravimétricas correspondientes a la bentonita sódica natural con la sódica activada y la cálcica natural [Sertucha y Suárez, 2004]. Se debe tener en cuenta que, para cada una de ellas, existen diversas variedades que pueden manifestar propiedades térmicas diferentes. A partir de estos datos, es posible observar cómo las características de los procesos en los que se elimina la humedad no dependen del tipo de bentonita analizada. En todos los casos, se trata de un proceso endotérmico que comienza a temperatura ambiente y tiene su máxima actividad en torno a los 100-110 °C. Las particularidades aparecen una vez obtenida la arcilla seca. La bentonita sódica natural es la que posee mayor estabilidad térmica, su degradación tiene lugar en un único proceso y pierde menos masa relativa en el quemado, empleando la menor cantidad de energía. Todo ello implica que, en general, los enlaces Al-OH situados en las capas cristalinas son más fuertes. La bentonita sódica activada es menos estable térmicamente y, en este caso, presenta como novedad dos procesos consecutivos de degradación. En el caso de la variedad cálcica, el intervalo de estabilidad es ligeramente más reducido, aunque su degradación transcurre

**Tabla 3.** Características térmicas de las bentonitas.

Tipo de bentonita	Deshidratación (°C)		Estabilidad anhidra (°C)	Deshidroxilación (°C)		Pérdida de masa en el quemado (%)	Energía (J/g)
	Intervalo	$T_{\text{mín}}$		Intervalo	$T_{\text{mín}}$		
Sódica natural	20-165	105	165-550	550-750	690	4,5	288,3
Sódica activada	20-165	115	165-380	380-740	495 680	6,5	126,5 179,6
Cálcica	20-180	100	180-330	330-765	700	6,5	404,9

en una única etapa térmica. En ambos casos, son similares tanto la pérdida de masa en el proceso de deshidroxilación como la energía empleada en él.

### 3.4. Control de las arcillas utilizadas en fundición (bentonitas)

Al igual que las arenas base, la realización de ensayos de control sobre los productos aglutinantes constituye un método eficaz para evitar variaciones en la calidad del suministro y, consecuentemente, problemas en el correcto funcionamiento del sistema de preparación de las arenas de moldeo. Estos ensayos de control deben ser exigidos a los proveedores, aunque las propias fundiciones también deben establecerlos para llevar un control interno de los materiales utilizados en la elaboración de las mezclas de arena. Las características comúnmente analizadas sobre una bentonita son: la humedad, los índices de hinchabilidad y sedimentación, los contenidos de montmorillonita y carbonatos, el grado de activación, el pH, el ensayo del azul de metileno (también llamado capacidad de intercambio de bases), la durabilidad, la granulometría y el límite líquido. En el caso de las fundiciones, los ensayos habitualmente utilizados para el control interno son el índice de hinchabilidad y el ensayo del azul de metileno.

Independientemente de la calidad, la granulometría de las bentonitas en el estado de suministro es un factor crítico a la hora de evaluar su capacidad de aglutinación. La elaboración de mezclas eficaces depende en gran medida del tamaño de los granos de la arcilla. De este modo, los cristales muestran mejores propiedades de cohesión cuanto más finos se encuentran en el estado de partida. Otro factor que influye directamente en la calidad de las mezclas de arena es el tipo de agua utilizado. Las impurezas tipo sales minerales (especialmente los carbonatos y/o el NaCl) u otras sustancias de naturaleza orgánica (residuos) son altamente perjudiciales puesto que se introducen en la estructura cristali-

na de las arcillas durante el proceso de mezclado y las desactivan.

## 4. CONCLUSIONES

La utilización de materiales inorgánicos juega un papel crucial en el desarrollo actual de las tecnologías de fundición. Tanto la posibilidad de modificar las características físicas y químicas de estas sustancias minerales como el creciente auge de productos sintéticos permiten reducir la incidencia de los defectos en las piezas fabricadas, asegurar su garantía de funcionamiento y minimizar los costes de proceso sin perjudicar la calidad del material.

Aunque tradicionalmente los defectos en las piezas se relacionan con aspectos metalúrgicos, y en concreto con los modelos de solidificación de los cristales metálicos, lo cierto es que las características de los moldes utilizados juegan un papel tan importante o más que aquéllos.

El conocimiento de las estructuras cristalinas de todos los materiales que componen los moldes y sus interacciones durante los procesos industriales contribuyen a la mejora de las condiciones de fabricación. Por otra parte, se plantean nuevos productos alternativos y vías de recuperación de las sustancias ya utilizadas, reduciendo el impacto ambiental en un sector especialmente crítico.

## AGRADECIMIENTOS

Queremos mostrar nuestro agradecimiento a todas las personas e instituciones relacionadas con el mundo de la fundición de hierro y que nos han facilitado la elaboración de este trabajo. Del mismo modo, agradecemos a Pascual Román por haber sugerido el tema de este trabajo y sus comentarios.

## REFERENCIAS

1. Brümmer, G. Origination, action and secondary actions of thermally decomposable carbon compounds in bentonite-bonded moulding sand. *Casting Plant + Technology International* 2001, 17, 24-29.
2. Granlund, M. J. How green sand systems are impacted by core sand dilution. *Modern Casting* 1999a, 35-37.
3. Granlund, M. J. Understanding the basics of green sand testing. *Modern Casting* 1999b, 38-40.
4. Heine, R. W.; Florey, C. W. Structure of green sands. *AFS Transactions* 2001, 39.
5. Heine, R. W.; Green, R. A. Properties of green sand bonded with mixtures of calcium and sodium bentonites. *AFS Transactions* 1992, 499-508.
6. Meehanite, *Manual of Casting Defects* (example nº 14), 1978.
7. Pickrell, K. C.; Sergeant, G. F.; Wolfe, M.; Wrobel, M. D. Tips for Auditing your green sand system. *Modern Casting* 1999, 30-40.
8. Ripke, S. J.; Kawatra, S. K. Fibrous bonding mechanism for reducing bentonite dosage. *AFS Transactions* 2000, 101-104.
9. Sertucha, J.; Suárez, R. *Arenas de moldeo en verde*, 1st Ed.; Azterlan, Durango, 2004.
10. Shih, T. S.; Zong, K. Z. Effect of mulling on green sand properties and mold quality. *AFS Transactions* 1999, 57, 767-772.