

Desarrollo de una nueva mezcla autofraguante para machos de fundición

L. PINO RIVERO ¹, J. HERNÁNDEZ-RUIZ ², E. VALENCIA-MORALES², E. VILLAR-COCIÑA² Y A. LÓPEZ VELÁSQUEZ ³

¹ CIS, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de las Villas, Cuba.

² Dpto de Física, Universidad Central de las Villas, Cuba.

³ Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.

En este artículo se describe el proceso de investigación y desarrollo de una nueva mezcla para machos de fundición, en el que se emplea un diseño de experimento para mezclas, factorial completo a dos niveles con relaciones de componentes y variable de operación. La mezcla que se desarrolla utiliza el tradicional proceso silicato de sodio (vidrio líquido) - CO₂ y como elemento novedoso se tiene el empleo de los esquistos carbonosos como aditivo desarenante. Se confecciona un nomograma que presenta la región donde las relaciones entre componentes muestran las mejores propiedades de resistencia a la compresión y desmoldeabilidad para la mezcla en estudio. Además, se realizó la caracterización higroscópica integral de la mezcla seleccionada como de mejores propiedades, la cual mostró excelentes propiedades higroscópicas, comparada con sus similares que emplean desarenantes del tipo azucarado.

Palabras claves: mezclas de moldeo para machos de fundición, silicato de sodio, diseño de experimentos, esquistos carbonosos micáceos.

Development of a new Self-hardening mixture for foundry cores.

In this paper is described the investigation process and development of a new mixture for foundry cores, in which a factorial complete at two levels experimental design for mixtures with relationships between the components and an operation variable is used. The mixture that is developed uses the traditional process sodium silicate - CO₂ and a new element has been employed: the carbonaceous schist as to facilitate the breaking down of the pieces from de moulds. A nomogram was made, in which it is represented the region where the relationships between components show the best properties, as resistance to the compression and breaking down. Also, it was carried out the integral hygroscopic characterization of the mixture selected as the best, which show excellent hygroscopic properties, compared with the similar ones that use for breaking down the cores, mixtures with sugary compounds.

Key words: foundry core mixtures, sodium silicate, experimental design, micaceous carbonaceous schist.

1. INTRODUCCIÓN

Se reconoce que el desarrollo alcanzado por la civilización humana está directamente relacionado con los materiales, particularmente con los metales y la industria para la elaboración de éstos, a saber, la industria de fundición. A pesar del desarrollo alcanzado por los métodos especiales de fundición, tales como la fundición en coquilla, a presión, en cáscara y otros; sigue siendo la fundición en moldes de arena el proceso más ampliamente usado ⁽¹⁻⁴⁾, debido a que con este método se obtienen altos rendimientos, se disminuyen los costos y los materiales generalmente son reusables.

Al mismo tiempo, en la actualidad entre las mezclas más usadas en la producción de moldes y machos se encuentran las del tipo autofraguante. Ello obedece en primer término a razones de costos y por otro lado, a las cada vez más rigurosas regulaciones medioambientales ⁽⁵⁾ pues, en estos casos los procesos de endurecimiento ocurren a temperatura ambiente, sin la necesidad de calor.

Entre las mezclas autofraguantes para machos, se estima ⁽⁶⁾ que de ellas, las que emplean el proceso silicato-CO₂ representan

alrededor del 80 %. Ello se debe a que el proceso silicato de sodio-CO₂ permite obtener machos rígidos, de dimensiones precisas y capaces de cumplir los requisitos de especificaciones más exigentes y tolerancias cada vez más estrechas. Esto, unido a la economía, limpieza, flexibilidad general inherente a este proceso y su reconocida compatibilidad con el medio ambiente, le han permitido trascender hasta nuestros días. Sin embargo, el proceso silicato-CO₂ presenta como principal inconveniente su reconocida mala desmoldeabilidad, o sea, el alto trabajo de desmoldeo que se requiere realizar para separar los moldes y machos de las piezas fundidas ⁽⁵⁻⁷⁾. Se sabe que esto provocó el desuso de estas mezclas y su sustitución por otras que usan diferentes procesos en base a resinas. Sin embargo, los elevados costos de estos aglutinantes y su alta toxicidad entre otras razones motivó el resurgimiento del silicato de sodio como aglutinante.

Además, se conoce que la desmoldeabilidad de las mezclas con silicato de sodio puede ser mejorada significativamente con el empleo de aditivos desarenantes. Entre los más usados se

encuentran el azúcar de caña, la melaza y sustancias carbonosas. Se ha demostrado ⁽⁸⁻¹²⁾ que el principal inconveniente de los aditivos azucarados es su alta higroscopicidad, es decir, su alta capacidad para absorber la humedad medioambiental, lo cual aumenta la cantidad de gases que se generan durante el vertido del metal líquido en los moldes y eleva significativamente la probabilidad de aparición de sopladuras y porosidades en las piezas fundidas.

En el presente trabajo se describe el estudio de una nueva mezcla autofraguante con vidrio líquido y proceso CO₂, la cual emplea como desarenante esquistos carbonosos micáceos, un mineral que puede ser empleado prácticamente en su estado original, solo se requiere su trituración y selección de la granulometría adecuada para la obtención de las mezclas. En el apartado 2 se describe el diseño experimental empleado para la búsqueda de una composición o mezcla de buenas propiedades. En esta sección también se presentan las características y las propiedades de los materiales empleados en el diseño de la mezcla, así como se describen las técnicas experimentales empleadas en la caracterización de sus propiedades tecnológicas. Finalmente, en la sección 3 se presentan y discuten los resultados obtenidos en la presente investigación, destacándose las buenas propiedades de los esquistos carbonosos micáceos como desarenante, además del buen comportamiento higroscópico que proporciona a las mezclas.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Planeación experimental

Las técnicas de diseño de experimentos son ampliamente usadas en la búsqueda de nuevas mezclas y en la optimización de mezclas tradicionales ⁽¹³⁻¹⁶⁾. En el desarrollo de la mezcla para machos que emplea esquistos carbonosos en calidad de desarenante que se describe en el presente trabajo, se utiliza un diseño de experimentos para mezclas factorial completo a dos niveles con relación de componentes y variable de operación.

En los experimentos con esta mezcla se tienen tres variables, de ellas dos corresponden a las relaciones de componentes:

$$r_1 = X_1 / X_2, \quad (1)$$

$$r_2 = X_1 / X_3 \quad (2)$$

y la tercera es el tiempo de soplado con gas carbónico (t_s) que constituye la variable de operación o de proceso. En estas relaciones, X₁ es el contenido de relleno (Arena de Sílice), X₂ es el contenido aglutinante (Silicato de Sodio) y X₃ es el contenido de desarenante (Esquistos Carbonosos Micáceos). Tanto la arena de sílice, como los esquistos son materiales sólidos granulados, de elevada superficie específica. El silicato de sodio forma una capa alrededor de los granos de estos materiales, de manera que los une y aglutina. Mientras el CO₂ al pasar a través de la capa de silicato de sodio, reacciona con éste y forma una estructura porosa de ácido silícico, lo que le proporciona a la mezcla elevadas resistencia a la compresión y superficial.

A cada una de las variables antes definidas se le asignan niveles máximo y mínimo de variación. Además, se definen

estos mismos tipos de niveles para las relaciones de componentes mediante las expresiones:

$$r_{\text{máx}} = X_{\text{máx}} / X_{\text{mín}}, \quad (3)$$

$$r_{\text{mín}} = X_{\text{mín}} / X_{\text{máx}}. \quad (4)$$

Si los rangos de variación de los constituyentes de la mezcla (seleccionados empíricamente) se encuentran entre 90 y 95 % para la arena de sílice (X₁), entre 5 y 6 % para el silicato de sodio (X₂), entre 2 y 4 % para los esquistos carbonosos micáceos (X₃) y entre 40 y 60 segundos para el tiempo de soplado, codificando los niveles máximo y mínimo de los rangos de variación de las relaciones de componentes y de la variable de proceso (t_s) como +1 y -1 correspondientemente y exigiendo el cumplimiento de la condición de normalidad, se obtiene la matriz del experimento que se presenta en la tabla I.

TABLA I. MATRIZ DE LOS EXPERIMENTOS PARA LA MEZCLA EN ESTUDIO.

Exp. N ^{ro}	r ₁	r ₂	t _s
1	15	22,5	40
2	18,6	22,5	60
3	15	46,5	40
4	18,6	22,5	40
5	15	46,5	60
6	18,6	46,5	60
7	18,6	46,5	40
8	15	22,5	60

2.2 Características y propiedades fundamentales de los materiales utilizados

2.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA SÍLICE UTILIZADA

En la elaboración de las diferentes mezclas se empleó como material de relleno la arena sílice, procedente del yacimiento "Casilda" en las proximidades de Trinidad en la provincia de Sancti-Spíritus, República de Cuba. Se trata de una arena de cuarzo de granos subangulosos redondeados, con menos de un 2 % de componente arcilloso y que contiene entre el 96 y el 98 % de SiO₂; de 0,05 a 0,12 % de Ca O; de 0,02 % a 0,06 de Mg O, de 0,22 a 0,62 % de Fe₂ O₃ de 2 a 2,6 % de Al₂ O₃. Durante el tamizado deja más del 70 % de sus granos en los tamices 0.2, 0.16 y 0.1 con la particularidad de que se encuentra un mayor residuo en el tamiz 0.2 que en el 0.1. Además, esta arena presenta un punto de sinterización de 1350 °C y su densidad se encuentra entre 2,5 y 2,8 g/cm³.

2.2.2 COMPOSICIÓN DE FASE Y MINERALÓGICA DE LOS ESQUISTOS CARBONOSOS MICÁCEOS

Los esquistos carbonosos micáceos se han obtenido a partir del mineral carbonoso procede del yacimiento "El

Algarrobo" en la provincia de Villa Clara, República de Cuba ⁽¹⁷⁾. El mineral seleccionado, está presente en los esquistos cristalinos. Sin embargo, el mayor porcentaje está asociado con los esquistos carbonatados micáceos en los que predomina el grafito amorfo.

Los esquistos carbonosos micáceos presentan entre un 4 y 5 % de C, 0,6 % de S y 16,79 % de Ca CO₃ entre otras fases. De ellos el 11,56 % constituyen sustancias volátiles y 88,44 % de cenizas. La composición mineralógica de la fracción usada (0,088 mm) presenta: 70 % de mica moscovita con impregnación de materia carbonosa, 19 % de material carbonoso, 1 % de mica biolítica y 10 % de cuarzo. Además, están presentes granos de óxido de hierro.

2.2.3. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL SILICATO DE SODIO Y DEL GAS CARBÓNICO EMPLEADOS

El silicato de sodio empleado posee 14,06 % de Na₂O, módulo de 2,064 y densidad de 1,505 g/cm³.

El gas carbónico (CO₂) empleado es producido por la planta de gases industriales de Villa Clara y comercializado en botellones de 5 Kg de gas licuado a una presión de 675 N/m² (150 lbf / cm²).

2.3 Descripción de los ensayos realizados

En la búsqueda de la relación más adecuada entre los constituyentes se ha seguido el criterio de seleccionar una mezcla con buenas propiedades de resistencia a la compresión a las 24 h y desmoldeabilidad, aunque además se evalúan otras propiedades como el grado de desgranamiento y la permeabilidad. También se estudió el comportamiento higroscópico de la mezcla seleccionada como de mejores propiedades.

2.3.1 PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS Y PROBETAS

Las mezclas se confeccionaron en base a 2 Kg de masa total para cada composición. Los materiales constituyentes se pesaron en una balanza biplato tipo PH-10U13Y, de exactitud 0,1g y capacidad 1kg.

El mezclado de los componentes se realizó en una mezcladora de laboratorio de rulos o rodillos, tipo LM-1 y de fabricación polaca (WADAD). Primeramente, se mezclaron los componentes sólidos durante dos minutos. Posteriormente, a la mezcla de los sólidos se le añadió el silicato de sodio y se mezclaron durante dos minutos más.

Después, se vació la mezcla en los vasos o cilindros seccionados y empleando el retacador se confeccionaron las probetas estandarizadas (50 x 50 mm) compactadas a tres golpes. El martinete o retacador usado, del tipo LUM-C y de fabricación polaca (WADAP), emplea una masa de 6,667 ± 0,001 kg y realiza un recorrido libre de aproximadamente 50,0 ± 0,2 mm.

Finalmente, las probetas se soplaron con CO₂ a presión de 0,2 MPa (2 atm) durante el tiempo que se especifica en la tabla I para cada composición o mezcla.

2.3.2 ENSAYOS DE RESISTENCIA

En la evaluación de la resistencia a la compresión a las 24 horas se empleó una prensa universal de fabricación

polaca (WADAP) del tipo L Ru-Ts para ensayos de resistencia con mezclas de moldeo. Esta prensa, permite además la realización de los ensayos de resistencia a la compresión en verde y resistencia a la tracción. Para los ensayos de resistencia a la compresión a las 24 horas se utilizaron las probetas cilíndricas 50 x 50 mm, confeccionadas a tres golpes, después de permanecer durante 24 horas en las intemperies del taller. Para la medición de esta resistencia se coloca la probeta en el portaprobetas habilitado para este fin, se selecciona el rango de presión en que se ha estimado se encuentra la presión a medir y se acciona el pistón hasta que se produzca la ruptura de la probeta. El registro de la resistencia a la ruptura y consecuentemente de la resistencia mecánica a la compresión a las 24 horas se realiza en las escalas correspondientes.

2.3.3 ENSAYO DE DESMOLDEABILIDAD

Los métodos de investigación de la desmoldeabilidad deben reproducir, en la medida de lo posible, las condiciones reales de calentamiento y enfriamiento a que son sometidos los moldes y machos en el proceso de fundición.

De forma general se distinguen dos grupos de ensayos ⁽¹⁸⁾:

1. Ensayos de Laboratorio
2. Ensayos de Taller

En los ensayos de laboratorio, la probeta no se somete a los esfuerzos mecánicos y térmicos, que en las condiciones reales de producción ejerce el metal fundido que se solidifica y enfría sobre el molde o macho. Por ello, se desarrolló el ensayo de segundo tipo, en el cual se reproducen aproximadamente las interacciones metal-mezcla, que en las condiciones reales tienen lugar. Para reproducir los factores que aproximan el ensayo a las condiciones reales de producción se colocaron probetas cilíndricas de 50 x 50 mm en el centro de una cavidad de molde que tiene 90 mm de diámetro y 50 mm de altura. Al verter el caldo metálico y éste solidificarse, se obtuvieron bujes fundidos. Estos bujes constituyen las probetas de ensayo que después se llevaron al laboratorio.

A partir de este momento el experimento transcurrió de forma similar al ensayo de laboratorio, en el que la desmoldeabilidad se valora mediante el trabajo que se gasta en el desmoldeo de una probeta.

La probeta de ensayo, que fuera previamente preparada en el taller, se somete al proceso de desmoldeo en el martinete para la elaboración de probetas, pero en este caso provisto del elemento percutor diseñado para este tipo de ensayo. Con el percutor se destruye la probeta de 50 x 50 mm que ha actuado como macho del buje fundido.

Contando el número de golpes necesarios para perforar cada probeta y conociendo el peso y la altura de caída de la carga empleada en cada caso, se calculó el trabajo de desmoldeo (*W*) usando la expresión:

$$W = nGH \quad (5)$$

donde *n* es el número de golpes proporcionados por el percutor sobre la probeta hasta su total destrucción, *G* es la masa de la carga que se libera y cae junto al percutor y *H* la altura de caída de la carga. Se empleó una carga de 6,667 ± 0,001kg con un recorrido de 50,3 ± 0,2 cm.

Comúnmente el trabajo de desmoldeo se expresa en kg-m (Sistema Técnico de Unidades) o en joule (J), según el SI de unidades.

2.3.4 ENSAYO DE DESGRANAMIENTO

Según Salcines⁽¹⁸⁾ el criterio más aceptado para expresar la propiedad de resistencia superficial de una mezcla es el grado de desgranamiento experimentado por una probeta bajo determinadas condiciones de trabajo, y se expresa por la pérdida relativa de peso que sufre la probeta en el tiempo, expresada en por ciento.

En la realización del ensayo se usó el equipo para la investigación de la resistencia superficial, también de fabricación polaca (WADAP), del tipo LS-1. Las probetas estándar 50 x 50 mm, compactadas a tres golpes, se pesaron previamente (P_i) y se situaron una cada vez sobre los rodillos. Las probetas son sometidas a las rotaciones y vibraciones que proporciona el equipo, a temperatura de 100 °C. Cuando cada probeta experimenta 750 vueltas, son nuevamente pesadas (P_f) y mediante la relación:

$$Gd = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100\%, \quad (6)$$

se determina el grado de desgranamiento (Gd).

2.3.5 ENSAYO DE PERMEABILIDAD

En la realización de este ensayo se empleó un permeómetro de fabricación polaca (WADAP) del tipo LV-C1. El equipo consta de un compresor que comunica un flujo de aire a presión constante de 9,8 kPa. Las probetas cilíndricas 50 x 50 mm, compactadas a tres golpes, se sitúan en el depósito tubular que posee el equipo y se determina la permeabilidad a partir de la cantidad de aire que deja pasar la probeta.

2.3.6 ENSAYO DE HUMECTACIÓN

Para evaluar el comportamiento higroscópico de la mezcla de mejores propiedades se realizaron dos tipos de estudio. Inicialmente, se determinó la ley de cambio de la resistencia mecánica a la compresión con el incremento porcentual en masa húmeda de probetas estandarizadas 50 x 50 mm, la cual permite determinar el incremento porcentual en masa húmeda crítico para la mezcla y posteriormente se determinó el coeficiente efectivo de difusión de la humedad ambiental en esta mezcla.

2.3.6.1 Ley de cambio de la resistencia mecánica a la compresión con la humectación de la mezcla

En este ensayo se emplean las probetas estandarizadas 50 x 50 mm, compactadas a tres golpes. La masa inicial de las probetas, entre 150 y 165 g, se midió en una balanza de exactitud 0.1g. Al primer grupo de diez probetas "secas" se le calculó la masa media y se le determinó la resistencia mecánica media a la compresión en la prensa universal. El resto de los grupos, de diez probetas cada uno, se situaron en una intemperie altamente humectante (~ 100 % Hr.) con humedad relativa y temperatura fija (25 °C).

La atmósfera experimental se creó artificialmente en una cámara climatizada especialmente diseñada para estos fines⁽⁸⁻¹²⁾. Esta cámara consta de un psicómetro acoplado, constituido por dos termómetros de exactitud 0,2 °C que permiten el registro de las temperaturas húmeda y seca, y mediante la

tabla psicométrica correspondiente se determina la humedad relativa en el interior de la cámara. El mantenimiento de la humedad requerida en la cámara se garantiza inyectando y extrayendo vapor de agua en el interior de la cámara, según sea el caso con un atomizador y mediante un extractor acoplado al cuerpo de la cámara respectivamente. La atmósfera interior se homogeniza mediante un sistema de ventilación que se encuentra instalado en la cámara y que hace circular el aire a muy baja velocidad.

Los diferentes grupos de probetas fueron extraídos a intervalos de 1 ½ horas, evitándose de esta forma la descompensación de la atmósfera interior de la cámara. A estos grupos de probetas se les determinó el incremento medio en masa y la resistencia mecánica media a la compresión, análogamente a como se hiciera con el primer grupo.

El incremento porcentual en masa húmeda de las probetas se calcula mediante la expresión:

$$\bar{C}(t) = \{[m(t) - m(t_0)]/m(t_0)\}100\%, \quad (7)$$

donde $m(t)$ es la masa de la probeta en el tiempo t de exposición a la atmósfera dada, la que se mide a intervalos de tiempos preferiblemente fijos y $m(t_0)$ es la masa de la probeta en el instante inicial del ensayo.

2.3.6.2 Determinación del coeficiente efectivo de difusión de la humedad ambiental en la mezcla

En este ensayo se emplearon probetas tipo pastilla finita de espesor l , diámetro d ($d > l$), las cuales se fabricaron a partir de las probetas estandarizadas 50 x 50 mm, compactadas a tres golpes. Estas probetas se colocaron ajustadamente en cápsulas de porcelana, tal como puede ser apreciado en el esquema de la figura 1. De esta forma se garantiza aproximadamente que las probetas sean permeables solo por una de sus caras⁽⁸⁾.

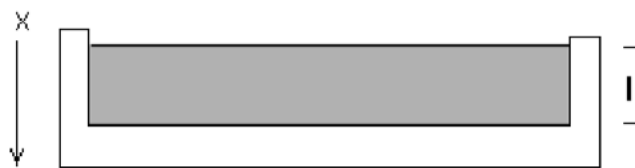


Figura 1. Esquema de la probeta tipo pastilla finita permeable solo por la cara superior.

La elección de este tipo de probeta tiene la ventaja de que se simplifica el tratamiento matemático al reducir el problema difusivo tridimensional al caso unidimensional. A su vez, esto no influye sobre el coeficiente de difusión, pues este coeficiente depende de la compactación del material de relleno, del tamaño de partícula y fundamentalmente de las propiedades físico-químicas del aglutinante entre otras propiedades y características de las mezcla.

El problema de difusión de la humedad ambiental en una pastilla finita de espesor l inicialmente "seca" y permeable por una cara, asumiendo coeficiente de difusión constante ($D = cte$) e independiente de la concentración se formula de la

siguiente manera ^(8, 10, 12, 19, 20):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (8)$$

con las condiciones iniciales y de frontera dadas por:

$$\begin{aligned} C(x,0) &= 0 & \forall x \in (0,l), \\ C(0,t) &= C_0 & \forall t > 0 \quad y \\ \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=l} &= 0 & \forall t > 0 \end{aligned} \quad (9)$$

siendo C_0 la concentración de humedad en la superficie libre de la pastilla.

La condición inicial indica que en el instante inicial, esto es, en el instante en que se inicia el proceso de exposición de la pastilla en el medio ambiente húmedo, con condiciones de humedad relativa y temperaturas constantes, la pastilla no contiene agua higroscópica. Según estudios realizados, ^(19, 20) esto es aceptado aun en el caso de las mezclas con silicato de sodio, donde cierta cantidad de agua (no humedad ambiental) es retenida inicialmente en la estructura del gel. Esta humedad contenida no afecta cualitativamente el proceso de absorción de humedad analizado, solo cambia el gradiente de concentración de agua entre la muestra y la atmósfera circundante.

Por otra parte, la primera de las condiciones de frontera expresa que, durante todo el tiempo que la pastilla permanece expuesta en el medio ambiente húmedo y controlado, la concentración de vapor de agua en su superficie exterior permanece constante e igual a C_0 . Mientras, la segunda de estas condiciones refiere el hecho de la impermeabilidad de la cara posterior de la pastilla.

Como en este caso, para la difusión de la humedad ambiental las probetas se comportan como un medio finito ^(8, 10, 12, 19, 20), la solución de problema antes formulado [ecuación 8-9] puede ser escrita en la forma ⁽²¹⁻²⁴⁾:

$$m_t/m_\infty = 1 - (8/\pi^2) \sum_{n=0}^{\infty} 1/(2n+1)^2 \exp \left[-(2n+1)^2 \pi^2 D t / 4 l^2 \right]. \quad (10)$$

La serie de esta ecuación converge rápidamente, por ello se justifica acotarla hasta el segundo término ^(8, 21, 22). El coeficiente de difusión se puede obtener haciendo uso de los métodos de ajuste no lineales ⁽²⁵⁾. Para ello, se programa el modelo de la ecuación (10) desarrollado hasta el segundo término y se ajusta a la data experimental de incremento porcentual en masa húmeda en función del tiempo. Ello permite obtener el coeficiente de difusión efectivo de la humedad ambiental en la mezcla a una intemperie determinada.

Para obtener las datas experimentales de incremento en masa húmeda en función del tiempo, las probetas inicialmente "secas", se situaron en la cámara climatizada antes descrita, pero ahora, a humedades relativas (Hr.) y temperaturas constantes, en rangos de humedades entre 60 y 95 % Hr.

Las probetas se extrajeron a intervalos de tiempo fijos y se determinaron los incrementos (decrementos) en masa húmeda en el tiempo. Para esto se empleó una balanza analítica digital de exactitud 0.1 mg. Los ensayos se dan por terminado cuando la masa húmeda de la pastilla $m(t)$ no cambia o cambia muy poco, es decir, cuando sus incrementos o decrementos están en el orden de exactitud de la balanza.

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Resultados del diseño experimental

En la tabla II se muestran los resultados obtenidos al ejecutar los ensayos antes descritos a las probetas elaboradas con las mezclas o composiciones de la tabla I, referidas al plan o diseño experimental.

Empleando herramientas estadísticas apropiadas, se realizó el análisis de regresión múltiple para cada una de las variables de respuesta. Los resultados se ajustaron según el modelo de regresión dado por una ecuación polinomial del tipo:

$$Y = b_0 + b_1 r_1 + b_2 r_2 + b_3 r_3 \quad (11)$$

TABLA II. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LOS ENSAYOS REALIZADOS A LAS DIFERENTES MEZCLAS O COMPOSICIONES.

Exp	Resistencia a la compresión, MPa	Desmoldeabilidad, J	Resistencia superficial, %	Permeabilidad, kPa
1	1,00	100	3	632
2	1,55	155	6,15	60
3	1,40	140	2,09	789
4	1,20	120	5,93	103
5	1,30	130	1,79	765
6	1,85	185	2,43	230
7	1,75	175	3,09	275
8	0,90	90	3,21	597

3.1.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LAS 24 HORAS DE SOPLADAS LAS PROBETAS

Del análisis de regresión múltiple entre la propiedad de resistencia mecánica a la compresión a las 24 horas y las variables independientes para cada una de las mezclas bajo estudio (r_1 , r_2 y t), se obtuvo la ecuación de regresión:

$$R_{24h} = 4,34641 - 0,20625*r_1 + 0,0234375*r_2 - 0,011875*t, [R^2= 93,0452 \%] \tag{12}$$

Teniendo en cuenta esta ecuación y el resumen de los resultados del análisis estadístico que se presenta en la tabla III, en particular el valor de la probabilidad que expresa el nivel de significación de las variables, nos muestra que la relación r_1 es significativa para un 99 % de confianza, en tanto la relación r_2 resulta significativa para un 95 % de confianza. Mientras, el tiempo de soplado con CO_2 no resulta significativo, lo cual podría parecer contradictorio, pero en el intervalo de tiempo escogido, la variación del tiempo no implica cambios apreciables en las propiedades de la mezcla y específicamente en sus propiedades de resistencia. De acuerdo con la ecuación (1) un incremento en el valor de esta relación, puede lograrse disminuyendo la cantidad de silicato de sodio respecto a la cantidad de arena sílice. Como el coeficiente correspondiente en la ecuación de regresión (ecuación 12) tiene signo negativo, entonces un incremento en la cantidad relativa de arena respecto a la del aglutinante, hace que disminuya la propiedad de resistencia mecánica a la compresión.

3.1.2 DESMOLDEABILIDAD

Al realizar el análisis de regresión múltiple entre la propiedad desmoldeabilidad y las variables r_1 , r_2 y t se obtuvo la ecuación de regresión:

$$Desmold = 1093,84 - 35,4861*r_1 - 0,802083*r_2 - 3,7125*t [R^2= 99,7275 \%] \tag{13}$$

De esta ecuación y de los resultados del análisis estadístico del diseño (tabla IV) se puede observar que en el caso de la desmoldeabilidad todas las variables independientes son significativas para un 99 % de confianza. De este modo, se verifica que la desmoldeabilidad es una propiedad altamente compleja, que depende de las relaciones entre componentes y del tiempo de soplado. Mientras más rígido es el esqueleto de ácido silícico que se forma, mayor es el trabajo que se requiere realizar para el desmoldeo y peor es el comportamiento de la desmoldeabilidad. La presencia en la mezcla de un agente desarenante capaz, bajo algún mecanismo, de actuar en detrimento de la hermeticidad de este esqueleto, mejora esta propiedad. En este caso, se están evaluando las propiedades de los esquistos carbonosos micáceos como agente desarenante. Durante la fabricación del macho, parte del carbono presente en los esquistos queda atrapado en la estructura del gel y luego, al verter el metal caliente en los moldes se combustiona, produciendo gases y debilitando la estructura del gel de ácido silícico que une los granos de arena. Con esto mejora las propiedades de desmoldeabilidad de la mezcla.

3.1.3 RESISTENCIA SUPERFICIAL

Del análisis de regresión múltiple entre la propiedad resistencia superficial y las variables r_1 , r_2 y t se obtuvo la ecuación de regresión:

$$R_{superficial} = -5,34448 + 0,652778*r_1 - 0,0885417*r_2 + 0,017*t [R^2=91,1099 \%] \tag{14}$$

y los resultados del análisis estadístico que se presentan en la tabla V.

De estos resultados se puede observar que las relaciones r_1 y r_2 resultan significativas para un 99 y 95 % de confianza respectivamente; en tanto, no resulta significativo el tiempo de soplado con CO_2 pues, como ya se ha explicado, en el intervalo

TABLA III. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

Coefficiente	Valor	Error Standard	t-student	Probabilidad
b_0	4,34641	0,723883	6,0043	0,0039
b_1	-0,20625	0,0365029	-5,65023	0,0048
b_2	0,023437	0,0054754	4,28048	0,0128
b_3	-0,011875	0,0065705	-1,80731	0,1450

TABLA IV. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA DESMOLDEABILIDAD.

Coefficiente	Valor	Error Standard	t-student	Probabilidad
b_0	1091,61	21,2901	51,2732	0,0000
b_1	-35,2083	1,07359	-32,7951	0,0000
b_2	-1,17708	0,161038	7,30936	0,0019
b_3	-3,5375	0,193245	-18,3057	0,0001

de tiempo escogido, la variación del tiempo no implica cambios apreciables en las propiedades de la mezcla.

3.1.4 PERMEABILIDAD

Al realizar el análisis de regresión múltiple entre la propiedad permeabilidad y las variables r_1 , r_2 y t se obtuvo la ecuación de regresión:

$$\text{Permeab} = -106,641 + 11,4583*r_1 + 1,82292*r_2 - 0,1875*t \quad [R^2 = 94,0105\%] \quad (15)$$

De esta ecuación y del análisis estadístico correspondiente que se presenta en la tabla VI se puede observar que tanto la relación r_1 , como la r_2 son significativas para un 99 % de confianza.

Como se explicó antes, de acuerdo con la ecuación (1) un incremento en el valor de esta relación se puede lograr si se disminuye la cantidad de silicato de sodio respecto a la cantidad de arena sílice. El signo positivo del coeficiente correspondiente en la ecuación (15) indica que un incremento en la cantidad relativa de arena respecto a la del aglutinante, favorece la propiedad de permeabilidad, lo cual se corresponde con lo que ocurre en el material, pues en la medida que la mezcla contiene menor cantidad de arena y mayor cantidad

de silicato el esqueleto del gel de ácido silícico que se forma es más hermético dificultándose la permeabilidad de la mezcla. Un comportamiento análogo se tiene con la relación r_2 , pues de acuerdo con la ecuación (2) un incremento en el valor de r_2 se puede lograr si se disminuye la cantidad de desarenante respecto a la cantidad de arena sílice.

Por otra parte, se tiene que no resulta significativo el tiempo de soplado con CO_2 , pues, como ya se ha explicado, la variación del tiempo en el intervalo estudiado no implica cambios apreciables en las propiedades de la mezcla, corroborándose que esto también es así para la permeabilidad.

3.1.5 SELECCIÓN DE LA MEZCLA DE MEJORES PROPIEDADES MECÁNICAS

El criterio para seleccionar una mezcla para macho de buenas propiedades establece que la mejor composición o simplemente mezcla, debe mostrar adecuados valores de resistencia a la compresión y desmoldeabilidad^(15, 16). De este modo, se trata de buscar un compromiso o balance entre estas variables. Como en los análisis anteriores se verificó que tanto las variables r_1 , como r_2 resultan muy significativas o significativas para el comportamiento de estas propiedades, entonces se construyó nomograma de la figura 2. En el mismo se observa el comportamiento de ambas propiedades en

TABLA V. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA RESISTENCIA SUPERFICIAL.

Coefficiente	Valor	Error Standard	t-student	Probabilidad
b_0	-5,34448	2,74151	-1,94947	0,1230
b_1	0,652778	0,138245	4,72189	0,0092
b_2	-0,0885417	0,0207368	4,26979	0,0130
b_3	0,017	0,0248841	0,683167	0,5320

TABLA VI. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA PERMEABILIDAD.

Coefficiente	Valor	Error Standard	t-student	Probabilidad
b_0	-106,641	41,884	-2,54609	0,0636
b_1	11,4583	2,11207	5,42517	0,0056
b_2	1,82292	0,316811	5,75396	0,0045
b_3	-0,1875	0,380173	-0,493197	0,6477

TABLA VII. RESULTADOS DEL AJUSTE SEGÚN EL MODELO DIFUSIVO PARA LA HUMECTACIÓN DE LA MEZCLA DE MEJORES PROPIEDADES A DIFERENTES INTEMPERIES.

HR.; %	l ; MM	$D \pm \Delta D$; MM ² /S	R^2	SCR	95 % IC	
					Desde	Hasta
60	3,25	$(4,08 \pm 0,10) \cdot 10^{-4}$	0,993	0,014	$3,90 \cdot 10^{-4}$	$4,28 \cdot 10^{-4}$
70	3,25	$(3,95 \pm 0,10) \cdot 10^{-4}$	0,992	0,016	$3,76 \cdot 10^{-4}$	$4,15 \cdot 10^{-4}$
80	3,25	$(2,64 \pm 0,11) \cdot 10^{-4}$	0,976	0,053	$2,45 \cdot 10^{-4}$	$2,83 \cdot 10^{-4}$
90	3,25	$(3,02 \pm 0,08) \cdot 10^{-4}$	0,988	0,025	$2,84 \cdot 10^{-4}$	$3,19 \cdot 10^{-4}$

función de las relaciones r_1 y r_2 para el tiempo medio de soplado (50 segundos). La desmoldeabilidad está representada por las zonas sólidas coloreadas y la resistencia a la compresión a las 24 h por las isolíneas que interceptan una o varias zonas de desmoldeabilidad. Como puede apreciarse, la zona violeta, de desmoldeabilidad entre 190 y 208 J, corresponde a una región de buenas propiedades de desmoldeabilidad. Esta zona es interceptada por la isolínea que corresponden a una resistencia a la compresión de 0,95 MPa. También es interceptada por otras tres isolíneas, pero de ellas, solo la correspondiente a una resistencia de 1,05 MPa, pudiera considerarse de desmoldeabilidad aceptable, pues además de la zona de desmoldeabilidad entre 190 y 208 J, interseca la zona adyacente de desmoldeabilidad entre 208 y 226 J, la cual aun puede considerarse aceptable. Mezclas con desmoldeabilidades por encima de estos valores no son recomendables. De este modo, una mezcla de buenas propiedades pudiera ser una que posea resistencia a la compresión a las 24 horas entre 0,95 y 1,05 MPa y desmoldeabilidades entre 190 y 208 J.

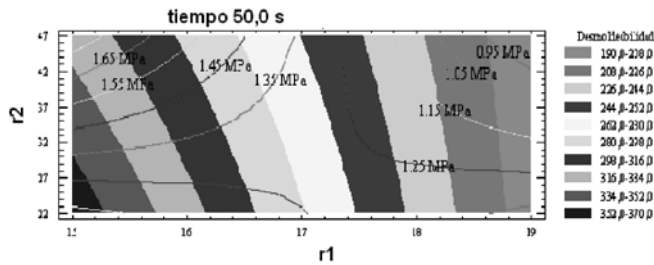


Figura 2. Nomograma de comportamiento de la resistencia a la compresión y la desmoldeabilidad en función de las relaciones r_1 y r_2 para el tiempo medio de soplado con CO_2 .

Al mismo tiempo en las figuras 3 y 4 se puede apreciar que en la región que se tomó como mejor para las propiedades de resistencia a la compresión a las 24h y desmoldeabilidad presenta buenos valores de permeabilidad y resistencia superficial respectivamente.

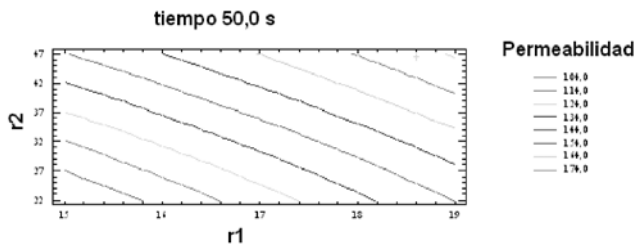


Figura 3. Isolíneas para la permeabilidad en función de las relaciones r_1 y r_2 .

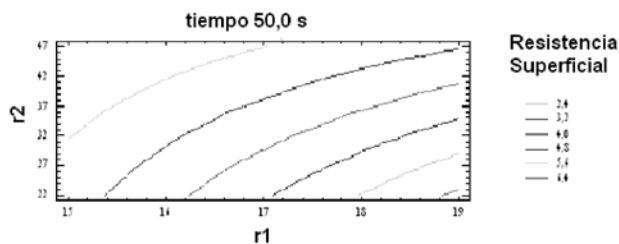


Figura 4. Isolíneas para la resistencia superficial en función de las relaciones r_1 y r_2 .

Particularmente, en el caso de la resistencia superficial, se obtienen resultados inferiores a 4,0%; lo cual es muy favorable para la producción de piezas de hierro fundido con las mezclas seleccionadas como de buenas propiedades.

3.2 Comportamiento higroscópico de la mezcla de mejores propiedades mecánicas

Empleando técnicas de ajuste no lineal de la data experimental se encontró que el decrecimiento de la resistencia mecánica a la compresión a las 24 horas que se produce con el incremento porcentual en masa húmeda de la probetas estandarizadas 50 x 50 mm compactadas a tres golpes y fabricadas con la mezcla de mejores propiedades, puede ser ajustado de acuerdo con una ley del tipo:

$$R = R_{inic} e^{-\bar{C}(t)/\bar{C}_{lim}} \quad (16)$$

tal cual se muestra en la figura 5.

En el propio gráfico se puede apreciar la buena correspondencia que existe entre la data experimental y el modelo teórico, de lo cual informan también los datos que se anexan a la figura y de la curva correspondiente a los residuos. La curva de los residuos presenta una ligera oscilación alrededor del cero, evidencia de una adecuada correspondencia entre el modelo teórico y la data experimental (26) pues, los residuos estandarizados se encuentran dentro de una banda centrada alrededor del cero, sin tendencia alguna a ser positivos o negativos.

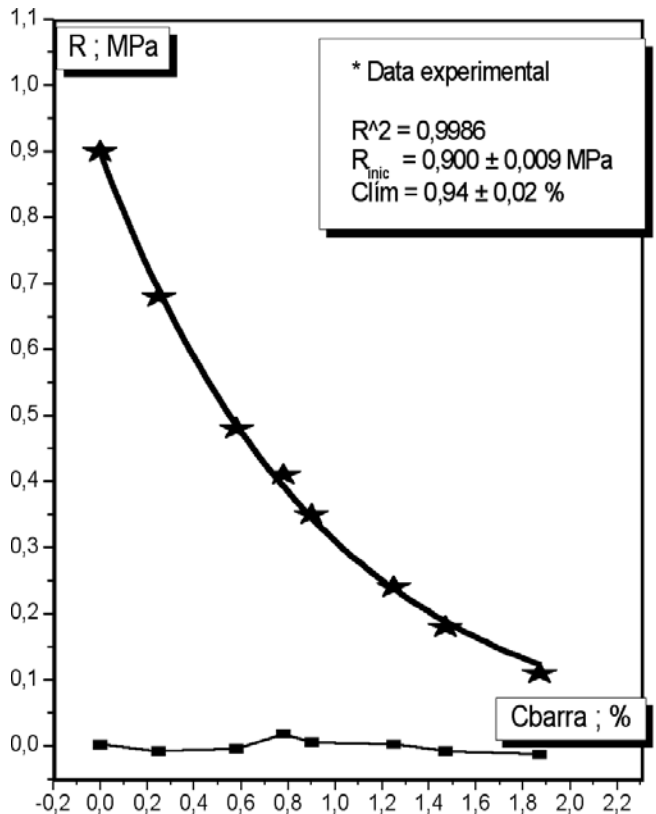


Figura 5. Comportamiento de la resistencia mecánica a la compresión a las 24 horas con el incremento porcentual en masa húmeda en probetas normalizadas.

Por otra parte, es evidente que este decrecimiento de la resistencia, que tiene lugar cuando las probetas se sitúan en intemperies de alto contenido de humedad (98-100 % Hr.), está asociado con la absorción del vapor agua desde este medio ambiente altamente húmedo por parte de la mezcla, lo cual actúa negativamente debilitando la unión entre los granos de arena.

Empleando la ecuación (15) y técnicas de interpolación Hernández Ruiz y colaboradores ⁽¹¹⁾ obtuvieron que la resistencia a la compresión y el incremento porcentual en masa húmeda límites para esta mezcla son 0,33 MPa y 0,94 % correspondientemente. Este incremento porcentual en masa húmeda límite da una idea de las magníficas propiedades higroscópicas de esta mezcla, si se compara ^(10, 11) con otras mezclas similares que emplean desarenantes azucarados. Sin embargo, es la caracterización de la cinética de absorción-desorción de la humedad ambiental en esta mezcla quien nos informa rigurosamente de sus propiedades higroscópicas y permite el cálculo del coeficiente efectivo de difusión de la humedad ambiental en la mezcla.

En la figura 6 se muestran el gráfico del incremento porcentual en masa húmeda (C_{barra}) en función del tiempo de exposición para las diferentes pastillas finitas y permeables por su cara superior, elaboradas con las mezcla de mejores propiedades y que fueran sometidas al ensayo de higroscopicidad en atmósferas con humedad relativa y temperaturas fijas y controladas. En ella, se pueden apreciar las curvas típicas de absorción y desorción de la humedad ambiental o agua higroscópica, en rangos de humedades

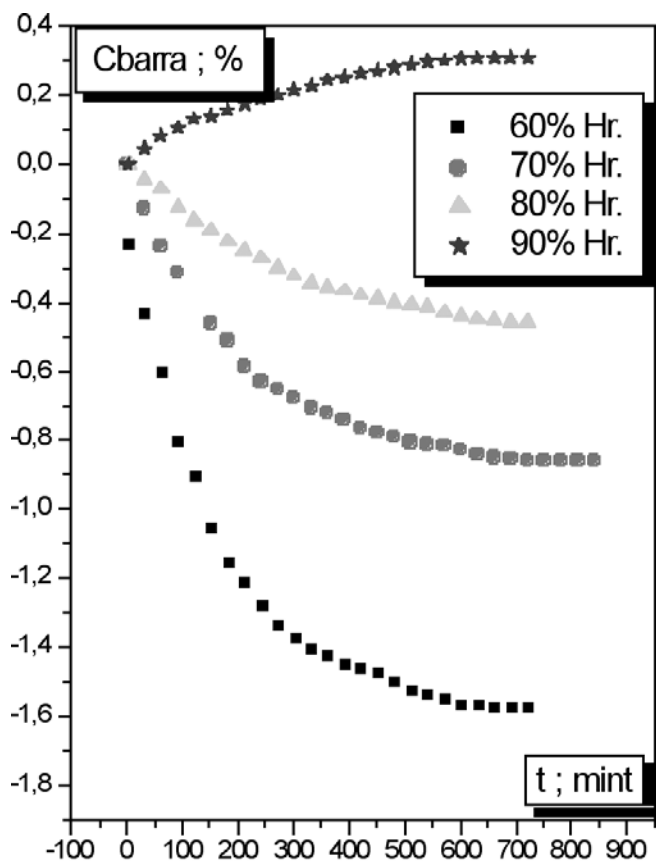


Figura 6. Curvas de la cinética de ganancia o pérdida en masa húmeda para la mezcla de mejores propiedades.

relativas ambientales típicas del clima tropical húmedo (60 – 95 % Hr.).

De la propia figura se tiene que los incrementos porcentuales en masa húmeda para el equilibrio, o sea, para cuando la pastilla no absorbe ni desorbe agua higroscópica a una determinada intemperie, con temperatura y humedad relativa fijas, presentan valores de -1,579; -0,858; -0,457 y 0,308 % para humedades de 60, 70, 80 y 90 % respectivamente. De esto se infiere que aun en humedades relativas en el entorno del 80 % la mezcla posee un carácter desortivo y para atmósferas con humedades relativas del 90 % el incremento porcentual en masa húmeda de equilibrio posee un valor relativamente bajo (0,308) si se compara con otras mezclas similares, pero que emplean otros tipos de aditivos desarenantes ^(10, 12).

Empleando técnicas de ajuste no lineal de la data experimental, se ajustaron las datas correspondientes a los incrementos porcentuales en masa húmeda en el tiempo para cada una de las humedades relativas según el modelo de la ecuación (10). Este procedimiento permitió encontrar los coeficientes efectivos de difusión del agua higroscópica desde o hacia la mezcla y consecuentemente el coeficiente de difusión medio. Estos resultados se presentan en la tabla VII. En ella también se ofrece la información sobre los análisis estadísticos correspondientes, reportándose el coeficiente múltiple de determinación (R^2), la suma residual de cuadrados (SCR) y para el índice de confiabilidad del 95 % con que se trabajó, además se informan los límites del intervalo de confianza correspondiente. Del análisis de estos resultados se infiere que en todos los casos analizados existe buena correspondencia entre la data experimental y el modelo difusivo de la ecuación (10).

De este modo, el coeficiente de difusión efectivo medio del agua higroscópica en esta mezcla es $D = (3,42 \pm 0,35) 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{s}$, el cual reencuentra en el orden de lo reportado para materiales similares ^(10, 12).

5. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta que la mejor mezcla para la fabricación de machos de fundición en la producción de piezas de hierro fundido, debe tener entre sus requisitos fundamentales; poseer una adecuada resistencia a la compresión y una desmoldeabilidad aceptable, se ha podido establecer como mejor mezcla aquella que presenta una resistencia a la compresión a las 24 horas entre 0,95 y 1,05 MPa y una desmoldeabilidad entre 190 y 208 J, encontrándose además, que la resistencia superficial y la permeabilidad tienen valores satisfactorios para las mezclas ubicadas en dicha zona. Del análisis de los resultados del diseño experimental se obtuvo que la relación r_2 resulta significativa para la desmoldeabilidad, lo cual implica que los esquistos carbonosos micáceos están jugando un papel importante en el comportamiento de esta propiedad, tal y como se previó, dadas las cantidades de carbono presentes en el mismo.

También se caracterizó el proceso de absorción y desorción del agua higroscópica por parte de la mezcla de mejores propiedades, encontrándose que esta mezcla presenta excelentes propiedades higroscópicas, pues el incremento porcentual en masa húmeda límite para esta mezcla es de 0,940 %, valor superior al que presentan las mezclas similares con aditivos azucarados. Además, la mezcla presenta un

carácter desortivo aun en humedades del entorno del 80 % Hr y para humedades relativas del 90 % el incremento porcentual en masa húmeda es tan solo del 0,308 %, muy por debajo del incremento límite que provoca el deterioro de las propiedades de resistencia de la mezcla.

6. AGRADECIMIENTOS

A la dirección de la Empresa de Servicios y Producciones Mecánicas "Enrique Villegas Martínez" de Santa Clara (Cuba) por la facilidades brindadas para la realización de los experimentos, particularmente a la Ing. MSc. Elisa Cedeño Linares jefa del Laboratorio de Mezclas y al Ing. A. Simón de la Rosa, tecnólogo de esta entidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Foundry Management and Technology, Section E: Molding, January, pp.2-6, 2000.
2. Foundry Management and Technology, Section E: Molding, January, pp. 3-12, 2001.
3. T. Cobett et al., The ABCs of green sand, Foundry Management and Technology, April, pp. 24-39, 2002.
4. F.F.O. Orumwense, Moulding properties of synthetic sand mixtures. A comparative study, Scandinavian Journal of Metallurgy, 31(2), pp.100-106, 2002.
5. IHOBE SA. ed., Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones: Arenas de moldeo en fundiciones férreas, Sociedad pública de gestión ambiental y Asociación de fundidores País Vasco y Navarra, 2000.
6. C.M. Salcines Merino, Mezclas con vidrio líquido. Proceso CO₂, pp. 367-425, En: Tecnología de fundición, Tomo I, Editorial Pueblo y Educación, Habana (Cuba), 1985.
7. A. Wolff y T. Steinhäuser, AWB-Un proceso de fabricación de machos compatible con el medio ambiente, Giesserei, 91(6), pp. 80-84, 2004.
8. E. Valencia Morales, Higroscopicidad en mezclas de arena y melaza para la fundición cubana, pp. 47 - 80, En: Higroscopicidad en los revestimientos de los electrodos básicos y mezclas de moldeo para la fundición cubana (Tesis doctoral), UCLV, Sta. Clara (Cuba), 1992.
9. E. Valencia-Morales et al., Moisture diffusion in some sand - molasses mixtures for iron foundry cores, Foundry Management and Technology, 109 (9), pp. 58-62, 2001.
10. J.E. Hernández-Ruiz et al., Difusión de humedad en mezclas de moldeo para machos de fundición, Bol. Soc. Esp. Ceram. V., 41(2), pp. 41-46, 2002.
11. J.E. Hernández Ruiz, E. Valencia Morales y E. Villar Cociña, Influencia de la humedad en el comportamiento de la resistencia a la compresión en mezclas de moldeo, Bol. Soc. Esp. Ceram. V., 40(2), pp. 107-113, 2001.
12. J.E. Hernández Ruiz, Capítulo 3 pp. 77-114, En: Determinación de la vida límite de machos de fundición fabricados con mezclas autofraguantes de virio líquido aplicando la teoría clásica de la difusión (Tesis doctoral), UCLV, Sta. Clara (Cuba), 2008.
13. J.A. Cornell and J.W. Gorman, Factorial designs plants for process variables in mixture experiments, J. Quality Technology, 16(1), pp.57-63, 1984.
14. O.O. Kenworthy, Factorial experiment with mixtures using ratios, Industrial Quality Control, 19(12) pp. 24 - 26, 1963.
15. J.E. Hernández Ruiz et al., Diseño factorial incompleto con relaciones y variables de proceso y la cinética de absorción-desorción del agua atmosférica en mezclas de moldeo con vidrio líquido y proceso CO₂, Construcción de Maquinarias, 20(1), pp.43-51, 1995.
16. J.E. Hernández-Ruiz et al., Optimización de mezclas con vidrio líquido y proceso CO₂, Rev. Fac. Ing. Universidad Tarapacá, 13 (2), pp. 51-57, 2005.
17. J.L. Díaz-Díaz et al., Determinación de la dinámica del relieve en terrenos montañosos: Un nuevo enfoque geomorfológico ambiental en la Sierra de Trinidad, Cuba Central, Inv. Geográficas (Boletín del Instituto de Geografía. UNAM: México), Núm. 48, pp. 24-43, 2002.
18. C.M. Salcines Merino, Propiedades de las mezclas y materiales de moldeo, pp. 195-289, En: Tecnología de fundición, Tomo I, Editorial Pueblo y Educación, Habana (Cuba), 1985.
19. E. Villar-Cociña, E. Valencia-Morales y R. González-Rodríguez, Kinetics of absorption of the environmental moisture in grainy materials, Revista Mexicana de Física, 47 (1), pp.37-42, 2001.
20. E. Villar-Cociña, Cinética de absorción de la humedad ambiental en mezclas de moldeo para fundición de hierro: modelo difusivo y difusivo compuesto, pp. 96-109, En: Modelos cinéticos para la caracterización de materiales puzolánicos y mezclas de moldeo para fundición de hierro (Tesis Doctoral), UCLV, Sta. Clara (Cuba), 2005.
21. J. Crank, Diffusion in a plane sheet, pp. 42-41, En: The Mathematics of Diffusion, 2nd ed. Clarendon Press, Oxford, 1975.
22. K-I. Okamoto, Sorption and diffusion of water vapor in polimide films, En: K.G. Malay y K.L. Mittal ed., Polymides. Fundamentals and Applications, Marcel Dekker Inc., pp.265 - 278, 1995.
23. P. Neogi, Transport phenomenon in polymer membranes, En: P. Neogi, ed. Diffusion in Polymers, Marcel Dekker Inc., pp.173-209, 1996.
24. C.L. Levoguer et al., Application Note 07, 12, 16, 29 y 30, En: Catalogue of Dynamic Vapour Sorption, Surface Measurement Systems, London, UK, 2005.
25. S. Huet et al., Statistical Tools for Nonlinear Regression, Springer series in Statistics, Springer, 1998.
26. M. Duflo, Applications of Mathematics Stochastic Modelling and Applied probability: Random iterative Models 34, Springer, 1997.

Recibido: 09/07/08

Aceptado: 20/03/09

