

OPTIMACIÓN DE MEZCLAS CON VIDRIO LÍQUIDO Y PROCESO CO₂

Jesús Hernández R.¹ Eduardo Valencia M.¹ Ernesto Villar C.¹ Jorge Vega L.¹ Julio Antiqueras M.²

Recibido el 16 de noviembre de 2004, aceptado el 16 de junio de 2005

RESUMEN

En este artículo son estudiadas tres mezclas de moldeo para machos de fundición aglutinadas con silicato de sodio y que emplean diferentes desarenantes, las que posteriormente son sopladas con gas carbónico. La composición adecuada para cada tipo de mezcla se determina mediante un diseño factorial incompleto con relaciones y variable de operación (1/3 3³). Como variables de respuestas se seleccionaron la resistencia a la compresión a las 24 horas y la desmoldeabilidad. Complementariamente se realizaron estudios de absorción de humedad y permeabilidad. Integralmente las mejores propiedades las manifestó la tercera de las composiciones correspondiente a la mezcla que emplea azúcar crudo como desarenante.

Palabras clave: Mezclas de moldeo, diseño de experimento y absorción de humedad.

ABSTRACT

In this paper three core moulding mixtures with sodium silicate and CO₂ process, employing different unbinders studied. The optimum composition for each mixture is found with a fractional factorial design which use relations of components and process variables (1/3 3³). The compression strength at 24 hours and the work to remove the core are selected as output variables. Complementarily, studies of moisture absorption and permeability are carried out. The best properties are obtained for the mixture having the third composition which employs sugar as unbinder additive.

Keywords: Molding mixtures, experimental design & moisture absorption.

INTRODUCCIÓN

Ya desde la década de los 70 son múltiples las ventajas que hacen retomar la práctica de los moldes de arena frente a las nuevas tecnologías que surgían en las fundiciones de hierro, dado entre otros factores por sus inferiores costos y no contaminación del medio ambiente. El proceso silicato-CO₂ se enmarca dentro de esta práctica pues sus ventajas resultan ser notablemente superiores a sus inconvenientes. Este proceso permite obtener machos de arena de dimensiones precisas y rígidas, capaces de cumplir los requisitos con especificaciones cada vez más exigentes y con tolerancias más estrechas, lo que unido a la alta resistencia, economía, limpieza y flexibilidad general, inherentes a este proceso, le han permitido su continuidad [1], [2]. Sin embargo, la alta desmoldeabilidad constituye un importante factor en su contra [3-6]. Esto último se ha podido reducir con el empleo de aditivos desarenantes [7], [8]. En la búsqueda de las composiciones óptimas, para mezclas de muy diversa naturaleza, las técnicas de

diseño de experimentos del tipo factorial han sido ampliamente empleadas [9-15].

En el presente trabajo se emplea un diseño factorial fraccionado para encontrar la composición adecuada de cada una de las tres mezclas de moldeo para machos de fundición que se estudian, las cuales emplean vidrio líquido y proceso CO₂.

Se han tomado como variables de respuesta parámetros tales como la resistencia mecánica a la compresión a las 24 horas y la desmoldeabilidad de las mezclas ensayadas. Además, para complementar los análisis en el caso de la mezcla que emplea azúcar como aditivo azucarado, se han tomado en consideración los resultados de los ensayos de humectación y permeabilidad realizados a las dos composiciones que de esta mezcla manifestaron las mejores propiedades de resistencia y desmoldeabilidad.

En la sección materiales y métodos se describe el diseño factorial incompleto con relaciones y variable de

¹ Departamento de Física, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara 54 830. V.C. Cuba.

² Departamento de Ing. Mecánica, Universidad de Magallanes, Punta Arenas. Chile.

operación empleado. También se ofrecen las propiedades y composición de los materiales usados y se describen los procedimientos de elaboración de las mezclas y las probetas y el ensayo de humectación realizado a dos de las mezclas con azúcar.

En la siguiente sección son presentados y discutidos los resultados. Se argumenta el porqué de la selección de las composiciones más apropiadas para cada una de las mezclas estudiadas. Finalmente se concluye que el tipo de diseño aquí empleado tiene un carácter puramente pragmático, pues si bien nos permite encontrar las composiciones óptimas para las mezclas estudiadas en la región del simplex investigado en cada caso, no es apropiado para la búsqueda de modelos polinomiales que expliquen teóricamente las propiedades de resistencia y desmoldeabilidad de las mezclas. Se destacan también las buenas propiedades higroscópicas de la mezcla Azúcar-3 y los beneficios que proporcionaría su uso frente a su similar Azúcar-10 dado por los ahorros que proporciona, sin que se afecte la operatividad y calidad del proceso tecnológico de elaboración de machos y de producción de las unidades fundidas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño factorial 1/3 3³

Se diseñó un experimento factorial incompleto con relaciones de componentes y variable de operación (1/3 3³) [15]. De manera que en los experimentos con cada mezcla se tienen tres variables experimentales, de ellas dos constituyen relaciones de componentes para la mezcla dada y la tercera es la variable de operación o proceso. A cada una de estas variables se le asignan niveles máximo, mínimo y medio de variación. De esta forma de cada experimento se ejecutan 1/3 3³ corridas experimentales. Adicionalmente se ejecuta al menos otra corrida correspondiente al centro, definido por los valores medio de cada una de las variables. Se definieron las relaciones:

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

$$r_2 = X_3 / X_2 \quad (2)$$

donde X₁ es el contenido de relleno (arena de sílice), X₂ es el contenido aglutinante (silicato de sodio) y X₃ es el contenido de desarenante (melaza, azúcar o mazut en dependencia de la mezcla de que se trate). Además como variable de proceso se definió el tiempo de soplado con gas carbónico (t_s).

Los rangos de las variables experimentales elegidos empíricamente [5-7], variarían en los intervalos:

$$\begin{aligned} X_{1\min} < X_1 < X_{1\max}, \\ X_{2\min} < X_2 < X_{2\max}, \\ X_{3\min} < X_3 < X_{3\max}, \\ (t_s)_{\min} < t_s < (t_s)_{\max}. \end{aligned}$$

En tanto, los rangos de variación de las relaciones y de la variable de proceso (t_s) se codificaron como -1, 0 ó +1 según sea mínimo, medio o máximo el nivel correspondiente. Las relaciones r₁ y r₂ se calcularon mediante las expresiones:

$$r_{\max} = X_{\max} / X_{\min} \quad (3)$$

$$r_{\min} = X_{\min} / X_{\max} \quad (4)$$

$$r_{\text{medio}} = (r_{\max} + r_{\min}) / 2 \quad (5)$$

En los cálculos de las matrices de los experimentos se exigió el cumplimiento de la condición de normalización:

$$X_2 (1+r_1+r_2) = 1 \quad (6)$$

teniendo en cuenta la conservación del centro con adecuada exactitud.

Esto permitió calcular las distintas composiciones a ensayar para cada una de las mezclas (Tablas 1, 2 y 3).

Tabla 1. Matriz de los experimentos relativos a la mezcla melaza.

Nº	r ₁	r ₂	T (s)	Y ₁ (Mpa)	Y ₂ (J)
1	13,39	0,10	40	1,10	3335,8
2	16,45	0,41	40	0,72	16,70
3	18,82	0,59	40	0,73	0,00
4	16,44	0,10	60	0,99	93,30
5	19,02	0,39	60	0,47	0,00
6	13,33	0,60	60	0,19	6,67
7	19,31	0,10	80	1,10	89,98
8	13,52	0,51	80	0,68	6,67
9	16,27	0,61	80	0,45	3,33
10	16,45	0,41	60	0,81	9,99

Tabla 2. Matriz de los experimentos relativos a la mezcla azúcar.

Nº	r ₁	r ₂	t (s)	Y ₁ (Mpa)	Y ₂ (J)
1	15,33	0,07	40	1,12	1764,88
2	19,77	0,51	40	1,50	21,24
3	24,36	0,28	40	0,93	11,44
4	19,77	0,06	60	1,05	19,70
5	24,23	0,51	60	1,12	39,40
6	15,38	0,28	60	1,25	13,18
7	23,93	0,07	80	0,90	18,06
8	15,17	0,50	80	1,20	9,85
9	19,16	0,27	80	1,15	437,50
10	19,77	0,51	60	1,00	3,28

Tabla 3. Matriz de los experimentos relativos a la mezcla mazut.

Nº	r ₁	r ₂	t (s)	Y ₁ (Mpa)	Y ₂ (J)
1	13,42	0,07	40	0,97	410,48
2	16,35	0,19	40	0,80	111,21
3	19,10	0,31	40	0,85	81,77
4	16,46	0,09	60	0,90	163,54
5	19,22	0,18	60	1,35	42,52
6	13,41	0,29	60	1,05	346,70
7	19,33	0,08	80	0,95	150,45
8	13,51	0,19	80	1,10	147,18
9	16,25	0,30	80	1,50	68,69
10	16,35	0,19	60	0,90	63,73

Como variables de respuesta del sistema se seleccionaron la resistencia mecánica a la compresión a las 24 horas (Y₁) y la desmoldeabilidad (Y₂).

Características y propiedades fundamentales de los materiales utilizados

En la elaboración de las mezclas se empleó como material base arena sílice del tipo 1k 016 A (Norma Soviética GOST 2138-74.), procedente del yacimiento Casilda en las proximidades de la Villa Trinidad en la provincia de Sancti-Spiritus en la región central de Cuba. Sus características y composición química han sido reportadas anteriormente [16]. Se trata de una arena de cuarzo con menos de un 2% de componente arcilloso y un contenido de SiO₂ entre el 96 y el 98%. Durante el tamizado dejó más del 70% de sus granos en los tamices 02, 016 y 01, con la particularidad de encontrarse un mayor residuo en el tamiz 02 que en el 01.

Se utilizó silicato de sodio de módulo 2,17 y densidad 1,49 g/cm³, el cual cumple con las exigencias que se le plantean a este material en su condición de aglutinante.

Los aditivos desarenantes utilizados fueron melaza, azúcar de barrido y mazut, atendiendo a ello se nombraron cada una de las mezclas. La melaza empleada, subproducto de la industria azucarera, se ajusta a las especificaciones para su uso en las fundiciones de hierro gris según la norma cubana NC-8105-81 (Cantidad mínima de sólidos solubles en la miel ≈ 36%, cantidad mínima de azúcares totales ≈ 52% y densidad 1,3 g/cm³) y cumple con las reglamentaciones para su almacenamiento y conservación con posterioridad a la entrega según la norma cubana NC-8121-85.

Elaboración de las mezclas y probetas

El cálculo para cada composición y mezcla se hizo en base a 2 kg de masa total. Las mezclas se confeccionaron en una mezcladora de rulos verticales, con tiempo de mezclado de dos minutos, después de añadir a la arena los componentes líquidos premezclados.

Se fabricaron probetas normalizadas (50x50 mm) compactadas a tres golpes en un recatador con vasos cilíndricos seccionados para finalmente gasearlas a una presión de 0.2 MPa.

Ensayos tecnológicos

Las probetas fabricadas para cada mezcla y composición se destinaron correspondientemente en grupos de veinte y diez para los ensayos de resistencia a la compresión y desmoldeabilidad [5], [17]. El ensayo de resistencia a la compresión fue realizado una vez conformadas las probetas y a las 24 horas de confeccionadas éstas.

Las mezclas Azúcar-3 y Azúcar-10 también fueron sometidas al clásico ensayo de permeabilidad [17], para lo cual también fueron destinados grupos de diez probetas en cada caso.

Ensayo de humectación

Complementariamente las mezclas Azúcar-3 y Azúcar-10 se sometieron a sendos ensayos de humectación. Para ello se elaboraron pastillas finitas de espesor l y diámetro d ($d \ll l$), permeables por una cara con cada una de estas mezclas. Los ensayos se ejecutaron en una cámara climatizada especialmente diseñada para estos fines [18-22], en la que se crearon las intemperies

experimentales a humedades relativas y temperaturas constantes. Esta cámara consta de un higrómetro acoplado que permite el registro de la humedad relativa y la temperatura. El mantenimiento de la humedad requerida en la cámara se garantiza inyectando o extrayendo vapor de agua en ella, según sea el caso. La atmósfera interior se homogeneiza mediante un sistema de ventilación instalado que permite la circulación de aire a muy baja velocidad en la cámara.

Los incrementos (decrementos) relativos en masa húmeda se determinaron en una balanza digital de exactitud 0,1 mg.

Las ganancias relativas de masa húmeda en el tiempo para cada mezcla y humedad relativa del medio experimental se determinan por [18-22]:

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

donde $m(t)$ es la masa después de la humectación (la masa del producto húmedo 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 muestra en el instante inicial del ensayo (masa del producto "seco").

El poder higroscópico de las mezclas (grado de hidratación) se compara mediante sus respectivas ganancias relativas de masa húmeda de equilibrio (C_∞). Dado que este parámetro sólo depende del tipo de mezcla y de la concentración de agua a una intemperie, esto lo

hace independiente de la geometría y dimensiones que en la práctica adopte la mezcla. Por ello (C_∞) es una constante para un tipo de material de moldeo dado y a una atmósfera de humedad relativa fija [18].

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Las Tablas 1, 2 y 3 (dos últimas columnas) refieren los valores promedios de la resistencia a la compresión a las 24 horas y de la desmoldeabilidad.

De los ensayos de resistencia a la compresión a las 24 horas y de desmoldeabilidad aquí reportados y sobre la base del establecimiento del compromiso entre estos parámetros, o sea cumpliendo con el requerimiento de buscar mezclas con buena resistencia y relativamente buena desmoldeabilidad, se determinó que las composiciones de mejores propiedades en cada una de las mezclas ensayadas corresponden a las M_{10} , A_3 y M_{A5} (Tabla 4). En estos análisis también se tuvo en cuenta la resistencia en verde de cada composición y los resultados del ensayo de humectación en el caso de la mezcla con azúcar como aditivo.

Se escogió como la composición que ofrece las mejores propiedades en el caso de la mezcla con melaza la correspondiente al centro del simplex estudiado (Melaza-10), por ser ella la que posee integralmente las mejores propiedades. Análogamente se procedió con la mezcla que emplea mazut, resultando seleccionada la composición 5 (Mazut-5).

Tabla 4. Mezclas que ofrecen las mejores propiedades.

MEZCLA	r_1	r_1	X_1	X_2	X_3	t (s)	Y_1 (Mpa)	Y_2 (J)
Melaza-10	16,45	0,41	92,1	5,6	2,3	60	0,81	9,99
Azúcar-3	24,36	0,28	95,0	3,9	1,1	40	0,93	11,44
Mazut-5	19,22	0,18	94,2	4,9	0,9	60	1,35	42,52

Tabla 5. Resistencia en verde y permeabilidad de las mezclas Azúcar-10 y Azúcar-3.

MEZCLA	R (Mpa)	P
Azúcar-3	0,90	125
Azúcar-10	0,90	133

En el caso de la mezcla con azúcar se seleccionó el Azúcar-3 a pesar de que la mezcla correspondiente al centro (Azúcar-10) en este caso presenta mejores resultados de resistencia a las 24 h y de desmoldeabilidad. Dado que ambas mezclas manifestaron baja resistencia inicial y permeabilidades similares (Tabla 5), entonces se impuso el criterio práctico, la mezcla Azúcar-3 alcanza propiedades satisfactorias de resistencia a las 24 h y de desmoldeabilidad con menor tiempo de soplado con CO₂, lo cual trae consigo el ahorro de este gas y del tiempo de operación. Esto pudiera parecer contradictorio a la luz de las técnicas de diseño de experimentos aquí aplicadas, mas por el contrario esto reafirma la idea de que el diseño es un instrumento flexible y que le permite al técnico adecuarlo a las condiciones y exigencias de su especialidad.

Por otra parte, los resultados de los experimentos de humectación realizados a las mezclas Azúcar-3 y Azúcar-10 (Fig. 1) muestran que la segunda de estas mezclas es más higroscópica que la primera en todo el rango de humedades ensayadas.

El análisis comparativo de los valores de las respectivas ganancias relativas de masa húmeda de equilibrio (C_{∞}) para cada mezcla y humedad relativa del medio exterior (Tabla 6) muestra que la razón entre éstas para las mezclas Azúcar-10 y Azúcar-3 es proporcional a la razón del contenido de azúcar de ellas ($X_{3,10}/X_{3,3}$). Al propio tiempo, esta razón manifiesta un ligero incremento con el aumento de la Hr del medio experimental.

Como la razón $X_{3,10}/X_{3,3}=2,2$ se infiere, de este hecho y de los análisis efectuados, que en la mezcla Azúcar-3 el contenido de azúcar puede ser reducido alrededor de un 50% con respecto a las mezcla Azúcar-10, sin que ello nos conduzca a valores no permisibles de resistencia y desmoldeabilidad. No sólo son significativos los ahorros que pueden obtenerse en azúcar al reducir el contenido de este aditivo, sino también los que se lograrían por concepto de disminución del índice de rechazo de las unidades fundidas al disminuir la generación gaseosa

asociada con la humectación de la mezcla, a la cual se le ha reducido el por ciento de azúcar, aditivo este altamente higroscópico. Resultados análogos se reportan para las mezclas arena-melaza [18].

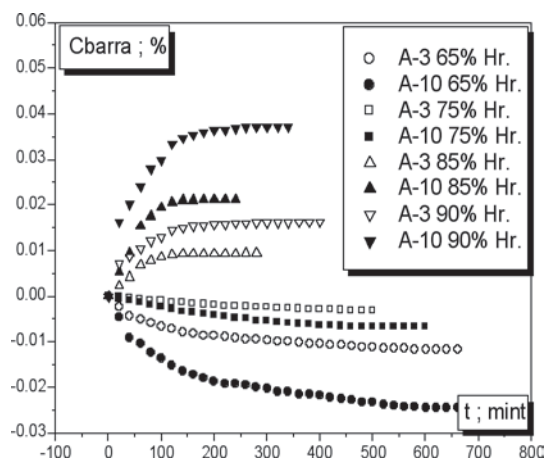


Fig. 1 Incremento porcentual en masa húmeda contra tiempo para las mezclas Azúcar-3 (A-3) y Azúcar-10 (A-10).

Cuando los resultados aquí obtenidos se comparan con los reportados para otras mezclas [18], [20-22] se corrobora el hecho de que los aditivos azucarados son notoriamente más higroscópicos que los no azucarados.

Con el fin de explicar el comportamiento de las variables de respuesta se seleccionaron varios modelos polinomiales; en general, dado por la alta dispersión de los coeficientes, por la carencia de interés de los modelos en algunos casos y por la baja correlación entre las variables experimentales en otros, resultó que los modelos polinomiales escogidos no explican satisfactoriamente el comportamiento de la resistencia a la compresión y la desmoldeabilidad en las mezclas estudiadas. Esto pudiera estar dado por la saturación de los modelos a estimar, lo que es evitable en principio si se repiten dos o tres veces los experimentos correspondientes al centro del simplex.

Tabla 6. Valores de \bar{C}_{∞} para las mezclas Azúcar-10 y Azúcar-3 para las diferentes Hr ensayadas.

MEZCLA	VALORES DE \bar{C}_{∞} A DIFERENTES % DE Hr.			
	65	75	85	90
Azúcar-10	-0,02455	-0,00659	0,02128	0,03725
Azúcar-3	-0,01166	-0,00307	0,00946	0,01639

CONCLUSIONES

Integralmente las mejores propiedades las manifiestan las mezclas: M_{10} , A_3 y M_{A5} . En particular el uso de la mezcla Azúcar-3, frente a su similar Azúcar-10 es altamente recomendable a pesar de que la segunda de ellas presenta ligeramente mejores propiedades de resistencia y trabajo de desmoldeo, dado fundamentalmente por sus comparativamente mejores propiedades higroscópicas y los ahorros que ello posibilita sin que se afecte la operatividad y calidad del proceso tecnológico de elaboración de machos y de producción de las unidades fundidas.

Esta mezcla posibilitará ahorros en gas carbónico, azúcar y posible reducción de los índices de rechazo introducidos por los defectos causados por la generación gaseosa asociada con la presencia del agua absorbida por la mezcla.

El diseño factorial incompleto con relaciones y variable de operación $1/3 \ 3^3$ aquí empleado tiene un carácter puramente pragmático, pues si bien nos permite encontrar las composiciones óptimas para las mezclas estudiadas en la región del simplex investigado en cada caso, no es apropiado para la búsqueda de modelos polinomiales que expliquen teóricamente las propiedades de resistencia y desmoldeabilidad de las mezclas.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Ubedel del Pino Paz por su inestimable ayuda a la hora de planear y realizar los análisis de los resultados de los diseños. Al Lic. Lázaro Pino Rivero por su apoyo en la realización de los experimentos, así como por sus criterios críticos y valiosas sugerencias.

REFERENCIAS

- [1] French Progress in Coremarking. Part III Silicate CO_2 . Foundry. 72-75. May, 1970.
- [2] The Distillers Company (Carbon Dioxide) Ltd. El proceso silicato CO_2 . Estado actual. Colada. Vol. 13, no. 11: 257-259. 1980.
- [3] C.M. Salcines Merino. Desmoldeabilidad de las mezclas con vidrio líquido. Tecnología de fundición. Tomo I. Editorial Pueblo y Educación. Habana. Cuba: 406-407. 1985.
- [4] A. González Rodríguez y otros. Desmoldeabilidad de las mezclas con vidrio líquido. Técnicas de Fundición (1): 15-18. 1988.
- [5] P. Rodríguez García y otros. Mezclas de silicato de alta desmoldeabilidad. Técnicas de Fundición (1): 27-32. 1988.
- [6] C.M. Salcines Merino. Desmoldeabilidad. Tecnología de fundición. Tomo I. Editorial Pueblo y Educación. Habana. Cuba: 274-276. 1985.
- [7] A. González Rodríguez y otros. Mejoramiento de la desmoldeabilidad de las mezclas con vidrio líquido. Construcción de Maquinarias. 11(2): 41-44. 1986.
- [8] D. Warren. Perfeccionamiento del proceso de elaboración de mezclas con vidrio líquido en Inglaterra. British Foundry-men. 64(12). 1971
- [9] O.O. Kenworthy. Factorial experiment with mixtures using ratios. Industrial Quality Control. 19(12): 24-26. 1963.
- [10] S. Akhnasarova and V. Kafarov. Mixture Design. Experiment optimization in chemistry and chemical engineering. MIR. Publishers. Moscow (URSS): 240-295. 1982.
- [11] J. A. Cornell and J.W. Gorman. Factorial designs plants for process variables in mixture experiments. J. Quality Technology. 16(1). 1984.
- [12] J.A. Cornell. Experiments with mixtures: Designs, models and the analysis of mixture data. John Wiley and Sons. 2nd Edition. 1990.
- [13] G. Pouskouleli and T. A. Wheat. Statistical Design in Ceramic: I. Role of Statistics in Materials Development and Production. J. Can. Ceram. Soc. 59(4): 41-46. 1990.
- [14] G. Pouskouleli and T. A. Wheat. Statistical Design in Ceramic: II. Designs for Mixtures J. Can. Ceram. Soc. 61(3): 184-189. 1992.
- [15] J.E. Hernández Ruiz y otros. 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 CO_2 . Construcción de Maquinarias. 20(1): 43-5. 1995.

- [16] C.M. Salcines Merino. Arenas y arcillas de moldeo. Tecnología de fundición. Tomo I. Editorial Pueblo y Educación. Habana, Cuba: 52-136, 1985.
- [17] C.M. Salcines Merino. Propiedades de las mezclas y materiales de moldeo. Tecnología de fundición. Tomo I. Editorial Pueblo y Educación. La Habana. Cuba: 406-407.1985.
- [18] E. Valencia Morales. Tesis en opción al grado de Dr. en Ciencias Físicas. Universidad Central de las Villas. Ministerio de Educación Superior. Sta. Clara. Cuba: 47-80. 1992.
- [19] E. Valencia. Morales. Hygroscopic Behavior of Certain Basic-Coated Electrodes in Wet Tropical Climate. *Welding International*. 8(3). 1994. *Rev. Soldadura*. Madrid. 23(2): 94-103, 1993.
- [20] E. Valencia Morales, Ernesto Villar Cociña, Jesús Hernández-Ruiz y Jorge Vega Leyva. Moisture Diffusion in Some Sand-Molasses Mixtures for Iron Foundry Cores. *Foundry Management and Technology*: 58-61. September, 2001.
- [21] J. E. Hernández Ruiz, E. Valencia Morales, E. Villar Cociña. Influencia de la humedad en el comportamiento de la resistencia a la compresión en mezclas de moldeo. *Bol. Soc. Esp. Cerámica y Vidrio*. 40(2): 107-113. 2001.
- [22] J.E. Hernández Ruiz, E. Valencia Morales, E. Villar Cociña y J. Vega Leyva. Difusión de humedad en mezclas de moldeo para machos de fundición. *Bol. Soc. Esp. Cerámica y Vidrio*. 41(2): 41-46. 2002.