

PERMANENCIA LÍMITE DE MACHOS DE FUNDICIÓN PREVIO A LA COLADA

PERMANENCY LIMIT OF FOUNDRY CORES BEFORE TO THE LAUNDRY

JESÚS E. HERNÁNDEZ-RUIZ
EDUARDO VALENCIA MORALES
CARLOS ALEJANDRO ALFONSO
JORGE VEGA LEYVA

E-mail: jesusehr@uclv.etcusa.cu
Universidad Central de Las Villas

RESUMEN: Se describe una metodología para el cálculo del tiempo de vida útil de machos de fundición de geometría cilíndrica durante su permanencia a la intemperie humectante del taller, desde el instante en que son elaborados hasta el momento de la colada. El problema del cálculo de los tiempos límites se resolvió mediante el análisis del proceso de difusión de humedad en estos materiales, y se encontró la dependencia funcional del tiempo límite con las dimensiones radiales del macho cilíndrico y con el coeficiente de difusión efectivo del agua atmosférica en la mezcla de fabricación del macho. También ha sido probada la dependencia del tiempo límite con el incremento porcentual en masa húmeda de equilibrio para una mezcla dada a una intemperie determinada y con el incremento porcentual en masa húmeda crítico para la mezcla en cuestión, así como con el contenido de humedad de la atmósfera a que se expone el macho.

Palabras clave: Mezclas de moldeo, macho de fundición, difusión, coeficientes de difusión, humedad y tiempos límites.

ABSTRACT: In this paper the methodology for calculating of useful life time of cylindrical founding core during its permanence in outdoor moisture, in the time intervals from instant in which they are made to laundry moment, is described. The problem of calculation the limiting time was solved by the moisture diffusion process analysis in these media. The functional dependence of limiting time with both radial dimensions of cylindrical core and the effective diffusion coefficient of the atmospheric water in the mixture, that was used for conforming the core, was found. The dependence of limiting time with both the percent increase in the equilibrium humid mass, the percent increase in the critical humid mass and the environmental moisture was found too.

Key words: Moulding mixtures, cores of foundry, diffusion, diffusion coefficients, moisture and limiting times.

INTRODUCCIÓN

El deterioro de alguna de las cualidades de la mezcla para machos y moldes de fundición trae consigo la aparición de un amplio espectro de defectos en las piezas fundidas.

La influencia de la humedad ambiental en el deterioro de la resistencia mecánica en mezclas arena-melaza (Valencia Morales, 1992) y en mezclas autofraguantes para machos de fundición (Hernández Ruiz y otros, 2001) se ha descrito, así como las leyes de tipo exponencial a las cuales obedecen la disminución de la resistencia mecánica a la tracción en las mezclas arena-melaza (Valencia Morales, 1992) y la disminución de la resistencia mecánica

a la compresión en las mezclas autofraguantes (Hernández Ruiz y otros, 2001).

La resistencia de una mezcla dada está directamente relacionada con el recubrimiento de los granos de arena por una película de espesor óptimo del aglutinante utilizado (Liass, 1975). Cuando este recubrimiento óptimo se altera o deteriora se produce entonces el decrecimiento de la resistencia del material aglutinado. El debilitamiento de los enlaces entre los granos de arena debido a la humedad incorporada, sobre todo en las capas más externas, unido a los cambios bruscos de volumen del cuarzo (575° C) cuando se vierte el metal fundido y a la alta presión metalostática, condicionan la aparición de fracturas en los machos, por las cuales penetra el caldo

TABLA 1. COMPOSICIÓN DE LAS MEZCLAS

Mezcla	Arena silíceas (%)	Silicato de sodio (%)	Tiempo de soplado S	Aditivo melaza (%)	Otros componentes (%)
M ₁₀	92,1	5,6	60	2,3	-
A ₃	95,0	3,9	40	-	Azúcar 1,1
M ₂	87,0	6,5	-	3,2	Sulfato de sodio 3,3
C ₁	93,5	5 % de solución con azúcar al 20 %	5	-	Cemento 1,5

metálico, dando origen a las penetraciones metálicas en las piezas fundidas (Thury y Sagmeister, 1979). Además, si a esto se adicionan los efectos erosivos que trae la fluidez del metal líquido, por las paredes del macho entonces se valora el deterioro por concepto de humectación de la resistencia general de los materiales de moldeo.

También, la formación de sopladuras y porosidades en las piezas fundidas está directamente relacionada con la generación gaseosa de los materiales de moldeo sobrehumedecidos, cuando sobre ellos se vierte el metal líquido. Las sopladuras pueden ser de dos tipos: las que se forman en la pieza fundida al penetrar los gases generados por los materiales de moldeo y quedar atrapados en el metal fundido (Dawson *et al.*, 1965; Fasham, 1973), y las debidas a gases, fundamentalmente hidrógeno y nitrógeno, los cuales son segregados en determinadas reacciones (Sims y Zapffe, 1941) que tienen lugar entre los materiales de moldeo y el metal durante el proceso de solidificación.

Se establece (Levelink y otros, 1980) que las sopladuras pueden ser evitadas si se garantiza que el proceso de solidificación comience cuando el período de efervescencia del metal líquido prácticamente haya concluido pero, aun en este caso la pieza fundida no queda exenta de defectos. Durante el período intenso de la efervescencia, debido al contacto prolongado de los vapores de agua con el metal líquido, se genera la formación de óxidos que permanecen en el metal concluida la solidificación en calidad de inclusiones. También, a causa de una intensa efervescencia se pueden desprender trozos de materiales de moldeo, sobre todo si se ha producido deterioro en sus propiedades de resistencia, los que aparecen ocluidos en el metal sólido.

Se ha descrito (Habibullah, 1978) el origen de las porosidades por burbujas de hidrógeno. La humedad presente en el material de moldeo es fuente de hidrógeno, pues durante la colada el agua presente en el molde o macho se disocia en hidrógeno y oxígeno. Este hidrógeno atómico es disuelto por el metal líquido y su solubilidad disminuye durante el proceso de solidificación, por lo que se segrega en los intersticios interdendríticos y lugares defectuosos, para dar lugar de esta forma a la porosidad.

Ha sido probado que la humedad relativa del medio influye significativamente en la aparición de los tipos de defectos antes descritos y, en consecuencia, en el aumento de los índices de rechazo de las piezas fundidas debido a las largas exposiciones de los moldes y machos de fundición, antes de la colada, en las intemperies altamente humectantes típicas del clima tropical y húmedo (Valencia Morales y otros, 1994).

Los defectos antes descritos pueden ser regulados si se controla adecuadamente la incorporación de humedad ambiental en los materiales de moldeo, lo cual puede lograrse normando los tiempos que los moldes y machos elaborados de determinadas mezclas pueden permanecer expuestos a determinada intemperie, sin que se incapaciten por concepto de humectación. Esto último es de importancia capital para la industria mecánica y en particular en la producción de piezas fundidas para la minería, donde se requiere una alta fiabilidad.

El presente trabajo tiene el propósito de, aplicando técnicas difusivas clásicas, calcular el tiempo de vida útil en ambientes humectantes, de machos de fundición de geometría cilíndrica, elaborados con mezclas autofraguantes típicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se ha afirmado (Salcines Merino, 1985 a) que no existe un método generalmente aceptado para la determinación de la higroscopicidad en las mezclas de moldeo. En general, se emplean dos formas de ensayos: en una de ellas se determina el incremento en peso húmedo de la probeta, y se designa la higroscopicidad por dicho aumento expresado en tanto por ciento; en la otra forma, un cierto número de probetas se someten durante un tiempo a condiciones de alta humedad relativa (~ 100 %) y se evalúa la forma en que esto altera una o varias propiedades de la mezcla previamente establecidas. Sin embargo, se ha demostrado (Valencia Morales, 1992) que para el cálculo del tiempo límite de permanencia de los machos de fundición en determinada intemperie se requiere el empleo de ambos métodos. Estudios previos (Hernández Ruiz y otros, 2000; Hernández Ruiz y otros, 2001) describen los resultados de la aplicación de ambos tipos de ensayos en mezclas autofraguantes para machos de fundición. La composición de las mezclas en análisis se ofrece en la Tabla 1.

Las denominaciones M₁₀, M₂, etc., se corresponden con la primera letra del componente que le ha dado nombre a la mezcla. El número que aparece como subíndice indica la composición de la mezcla, que en el diseño dado ofrece las mejores propiedades o corresponde a una composición de propiedades adecuadas ubicada en la zona del simplex en estudio (Hernández Ruiz y otros, 1995). Las características y propiedades de los materiales se describen en la literatura (Salcines Merino, 1985 b; Hernández Ruiz y otros, 2000; Hernández Ruiz y otros, 2001).

Los resultados de la cinética de humectación de las mezclas (Tablas 2 y 3) han sido tomados de estudios precedentes (Hernández Ruiz y otros, 2000; Hernández

TABLA 2. COEFICIENTES EFECTIVOS DE DIFUSIÓN DE HUMEDAD EN LAS MEZCLAS EXPUESTAS A DETERMINADAS INTEMPERIES

Mezcla	Hr (%)	C _∞	D _{EXP.} ·10 ⁻⁴ mm ² /s
M ₁₀	75	1,02	4,70
	85	1,53	4,36
	90	2,35	3,62
A ₃	85	0,95	10,68
	90	1,62	3,36
M ₂	85	4,64	3,47
	90	5,16	2,07
C ₁	85	1,95	3,51
	95	9,91	2,21

Ruiz y otros, 2001) y constituyen el punto de partida para el desarrollo de la metodología de cálculo de los tiempos límites de permanencia de los machos a determinada intemperie. En la Tabla 2 aparecen los incrementos porcentuales en masa húmeda hasta que las mezclas alcanzan la saturación y los coeficientes de difusión efectivos del agua atmosférica en las mezclas durante su exposición a determinadas intemperies, en tanto que en la Tabla 3 se reportan los valores críticos de la resistencia mecánica a la compresión en probetas normalizadas y el incremento porcentual en masa húmeda límite correspondiente para cada una de las mezclas en estudio.

Cuando la caracterización higroscópica de las mezclas abarca el conocimiento de la rapidez con que el material incorpora humedad, del incremento porcentual en masa húmeda en el equilibrio para una mezcla dada en una intemperie determinada y del incremento porcentual en masa húmeda límite para la mezcla en cuestión, entonces el cálculo del tiempo límite de permanencia de machos de determinada geometría expuestos a esa intemperie humectante es una tarea relativamente sencilla. El problema se soluciona empleando las herramientas de la difusión clásica, y se requiere resolver la ecuación de difusión para el tiempo en el cual el macho no se incapacita por concepto de humectación, en correspondencia con las condiciones concretas a las que se somete el macho durante su permanencia previa a la colada.

Cálculo del tiempo límite

Entonces, para determinar el tiempo límite de exposición de los machos de configuración cilíndrica conviene, por un problema de simplicidad, resolver la ecuación de difusión en coordenadas cilíndricas. Para machos en los que el diámetro *d* es mucho menor que su longitud e inicialmente "secos", asumiendo coeficiente de difusión constante y que la humedad relativa del medio permanece aproximadamente constante durante el tiempo de exposición, el problema planteado adquiere la forma:

$$\partial C/\partial t = D(\partial^2 C/\partial r^2 + 1/r(\partial C/\partial r)) \tag{1}$$

con las condiciones iniciales y de frontera dadas por:

$$C(r,0) = 0 \quad \forall r > 0 \quad \text{y} \\ C(a,t) = C_0 \quad \forall t > 0 \tag{2}$$

siendo C₀ la concentración de agua atmosférica en la superficie del cilindro y *r* el radio del macho cilíndrico.

La solución del problema, expresada en términos de la ganancia relativa en masa húmeda del macho, puede ser escrita en la forma (Valencia Morales, 1992):

$$M_t / M_\infty = \bar{C}(t) / \bar{C}_\infty = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4e^{-D\alpha_n^2 t}}{(a\alpha_n)^2} \tag{3}$$

donde *a* es el radio del macho y α_{*n*} son las raíces de la función de Bessel de orden cero J₀(*a*α_{*n*})=0. En tanto M_{*t*} / M_∞ = $\bar{C}(t) / \bar{C}_\infty$ es la relación entre las masas de agua atmosférica absorbida en un instante dado y en el tiempo teóricamente infinito, la cual, como refiere la propia igualdad, es igual a la relación entre los incrementos porcentuales en masa húmeda en un instante dado $\bar{C}(t)$ y en el equilibrio \bar{C}_∞ . Además, *D* es el coeficiente de difusión del vapor de agua en la mezcla y *t* el tiempo de exposición del macho a la intemperie dada.

La serie de la ecuación (3) converge rápidamente para *Dt* > 0, por ello se justifica aproximarla hasta el segundo término (Valencia Morales, 1992). Empleando técnicas de aproximaciones sucesivas (método de la aproximación de Born) (Elsgolttz, 1983) se resuelve la ecuación trascendente para el tiempo en el cual se alcanza el incremento porcentual en masa húmeda límite. Se encontró que el tiempo límite de exposición a las diferentes intemperies humectantes para los machos cilíndricos, con las condiciones que ya han sido especificadas, puede expresarse por:

$$t_{lim} = ka^2 / D \tag{4}$$

en la que el factor *k* viene dado por la expresión:

$$k = -(0,173) \cdot \ln(1,446 \cdot X(\bar{C}) - 0,19(1,446 \cdot X(\bar{C}))^{5,27}) \tag{5}$$

TABLA 3. VALOR LÍMITE DE RESISTENCIA E INCREMENTO EN MASA HÚMEDA PARA CADA MEZCLA

Mezcla	R _{LIMI} ; MPA	C(t) _{lim} ; %
M ₁₀	0,30	0,52
A ₃	0,34	0,75
M ₂	0,25	0,71
C ₁	0,26	0,70

los valores de α_n para $n = 1$ y $n = 2$ se han tomado de la literatura (Tijonov y Samarsky, 1980) y en la función:

$$X(\bar{C}) = 1 - \bar{C}(t) / \bar{C}_\infty \tag{6}$$

así definida, el tiempo de exposición del macho a una intemperie dada t coincide con el tiempo límite t_{lim} cuando el incremento porcentual en masa húmeda en el tiempo $\bar{C}(t)$ es sustituido por el incremento porcentual en masa húmeda crítico o límite, simbólicamente hablando esto es $t = t_{lim}$ cuando $\bar{C}(t) = \bar{C}_{lim}$. Los valores del incremento porcentual en masa húmeda crítico que aparecen en la Tabla 3 corresponden a los resultados obtenidos en estudios previos (Hernández Ruiz y otros, 2001), en los que se empleó el deterioro de la resistencia mecánica a la compresión con el incremento porcentual en masa húmeda de probetas normalizadas como el criterio para determinar el incremento porcentual en masa húmeda límite.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La expresión (4) muestra que el tiempo límite de permanencia de los machos cilíndricos es función de sus dimensiones, del factor k definido mediante la ecuación (5) y del coeficiente efectivo de difusión del vapor de agua en la mezcla. El tiempo límite de permanencia depende directamente del cuadrado del radio del macho cilíndrico, por ello el especial cuidado que hay que prestarle en sentido general a la humectación de los machos de pequeñas dimensiones (radio). La dependencia inversa de los tiempos límites con el coeficiente de difusión de humedad, prueba que el tiempo de permanencia es mayor o menor en la medida en que correspondientemente sea menor o mayor la velocidad con que el material incorpora vapor de agua, tal como era de esperarse.

De las ecuaciones (5) y (6) se aprecia la dependencia del coeficiente k y, consecuentemente, del tiempo de permanencia con el incremento porcentual en masa húmeda de equilibrio para una mezcla dada a una determinada intemperie y con el incremento porcentual en masa húmeda crítica para la mezcla en cuestión.

A partir de la ecuaciones (4), (5) y (6), y haciendo uso de los parámetros determinados en los estudios de la cinética de humectación de estas mezclas (Hernández Ruiz y otros, 2000; Hernández Ruiz y otros, 2001) (Tablas 2 y 3) se fijó el tiempo límite de permanencia de los machos cilíndricos para cada mezcla y a determinadas intemperies. La Tabla 4 ofrece las ecuaciones obtenidas, las que constituyen funciones del radio de los machos. En la ecuación (6) el incremento porcentual en masa húmeda para cada mezcla en un instante dado se sustituyó por el incremento porcentual en masa húmeda crítico correspondiente que aparece en la Tabla 3.

En la Tabla 4 para los casos de las mezclas M_{10} y A_3 , se aprecia cómo para un macho de una mezcla dada y radio a el tiempo límite de permanencia decrece en la medida en que es situado en intemperies de mayor contenido de humedad relativa, lo que hace que el incremento porcentual en masa húmeda de equilibrio crezca y, consecuentemente, en correspondencia con las ecuaciones (6) y (5), el factor k decrezca. Sin embargo, esto no se cumple para las mezclas M_2 y C_1 , lo cual no está en correspondencia directa con lo que predicen estas ecuaciones. En el caso de la mezcla M_2 para humedades relativas cercanas al 80 % se describen reacciones de nucleación y crecimiento de nuevas fases (Hernández Ruiz y otros, 2000). A pesar de que se está operando con humedades relativas por encima de ésta (85 % Hr, Tabla 4), para las cuales no se reporta la ocurrencia de las reacciones antes mencionadas (Hernández Ruiz y otros, 2000), no se puede descartar la posibilidad de su ocurrencia, en menor grado, aunque la técnica experimental aplicada no haya posibilitado su detección. Al estar empleando un modelo difusivo para describir el comportamiento de la humectación del material, el que en una primera aproximación es aplicable y resulta útil, pues la información que brinda del sistema permite realizar su descripción aproximada, no es ilógico esperar que los resultados puedan no estar en correspondencia total con lo que predice el modelo.

Algo análogo a lo descrito antes pudiera estar ocurriendo en el caso de la mezcla C_1 , donde a pesar de que no se reporta la ocurrencia de reacciones de nucleación y crecimiento de nuevas fases (Hernández Ruiz y otros, 2000), no se puede descartar su ocurrencia, máxime cuando esta mezcla contiene 1,5 % de cemento en su composición y el agua atmosférica que incorpora la mezcla puede ser usada en la formación de hidrosolvatos.

Cuando la metodología para la determinación de los tiempos límites de permanencia de los machos en intemperies humectantes en tiempos previos a la colada, antes descrita, se aplica a machos reales se puede apreciar el valor práctico de ella. Así, por ejemplo, para el macho para Spray de radio $a = 40$ mm y longitud $l = 250$ mm, y fabricado con la mezcla M_{10} , aplicando la expresión para el cálculo del tiempo límite correspondiente a cada humedad relativa, según se reporta en la Tabla 4, se tiene que en humedades en el entorno del 75 % Hr puede permanecer

TABLA 4. TIEMPOS LÍMITES PARA CADA MEZCLA Y HUMEDAD EN FUNCIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL MACHO CILÍNDRICO DADO

Mezcla	Hr ; %	$t_{lim} = K a^2 \text{ horas} / \text{mm}^2$
M_{10}	75	0,040 a^2
	85	0,024 a^2
	90	0,011 a^2
A_3	85	0,055 a^2
	90	0,045 a^2
M_2	85	0,055 a^2
	90	0,061 a^2
C_1	85	0,031 a^2
	95	0,177 a^2

sin que se incapacite por concepto de humectación 16 horas, en tanto que si se sitúa en atmósferas con 85 % Hr puede hacerlo hasta 9,6 horas y si se coloca en humedades del 90 % Hr sólo puede permanecer durante 4,4 horas, pasadas las cuales no se recomienda su uso. En humedades por encima del 90 % Hr deben ser usados prácticamente en el momento mismo de su elaboración. Esto es de gran valor para el tecnólogo, quien sólo disponiendo de la expresión del tiempo límite para cada tipo de mezcla y humedad relativa del medio puede evaluar el tiempo de vida útil de un macho dado. De este propio ejemplo se deriva una recomendación práctica inmediata: elaborar primero los machos de radios mayores y los de radios pequeños en momentos próximos al vertido del caldo metálico, sobre todo en los meses más húmedos del año.

CONCLUSIONES

1. La metodología antes descrita ha sido desarrollada para el cálculo del tiempo límite de permanencia de machos elaborados de mezclas autofraguantes y de geometría cilíndrica que son expuestos a las altas humedades relativas típicas de los climas tropicales y húmedos, como es el caso del clima cubano. Se ha probado que la metodología en cuestión permite el cálculo del tiempo límite de permanencia o de vida útil de machos que presentan esta geometría, elaborados con mezclas autofraguantes, en las intemperies altamente humectantes del taller de fundición durante su permanencia previa al vertido del metal líquido en los moldes.
2. Esta metodología también puede ser empleada para machos elaborados con otros tipos de mezclas, siempre que se garantice que se cumplan las condiciones iniciales y de frontera especificadas durante el planteamiento del problema del cálculo del tiempo límite y sumadas en la expresión (2). En todos los casos debe garantizarse que durante la humectación de la mezcla no tengan lugar reacciones de nucleación y crecimiento de nuevas fases. Asimismo, la metodología presentada puede ser aplicada de forma análoga a machos de geometría plana, cúbica y otras, siempre que el macho real tenga una configuración que se corresponda con una de estas geometrías de alta simetría y se resuelva el problema de difusión de humedad para la geometría dada, con las condiciones iniciales y de frontera que imponga la utilización práctica del macho durante su permanencia previa a la colada, similarmente a como se resolvió en el apartado: Cálculo del tiempo límite.
3. Se ha demostrado la dependencia directa del tiempo límite del cuadrado de las dimensiones radiales de los machos y del contenido de agua de la atmósfera a la que se exponen éstos. Esta dependencia, obtenida de la aplicación del modelo difusivo, no debe ser interpretada con fidelidad cuando en la mezcla puedan estar ocurriendo reacciones de nucleación y

crecimiento de nuevas fases. Sin embargo, las relaciones que de la aplicación de este modelo se derivan pueden ser empleadas siempre que su eficacia sea verificada prácticamente. También ha sido probada la dependencia inversa del tiempo límite de permanencia con el coeficiente de difusión de humedad en el material, así como su dependencia con el incremento porcentual en masa húmeda de equilibrio para una mezcla dada a una intemperie determinada y con el incremento porcentual en masa húmeda crítica de la mezcla en cuestión.

BIBLIOGRAFÍA

- DAWSON, J. V.; J. A. KILSHAW y A. D. MORGAN: "The nature and Origin of Gashole in Iron Casting", *BCIRA Journal* 7: 445-451, 1965.
- ELSGOLTZ, L.: "Principios de las transformaciones de contracción", en *Ecuaciones diferenciales y cálculo variacional*, pp. 51-56, Ed. Mir, Moscú, 1983.
- FASHAM, E. W.: "Practice Aspects of Mould and Core Permeability", *The British Foundryman* 5:162-170, 1973.
- HABIBULLAH, P.: "Consideraciones generales sobre el mecanismo de formación de sopladuras por reacción metal-molde en piezas moldeadas de acero", *Colada* 11 (41): 124-127, 1978.
- HERNÁNDEZ RUIZ, J. E., E. VALENCIA MORALES y E. VILLAR COCINA: "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.
- HERNÁNDEZ RUIZ, J. E., E. VALENCIA MORALES, C. ALEJANDRO ALFONSO y E. VILLAR C.: "Humectación de mezclas de moldeo para machos de fundición", en *Memorias V Convención Internacional de las Industrias Metalúrgica, Mecánica y del Reciclaje METANICA' 2000*, Ciudad de La Habana, Cuba, 2000.
- HERNÁNDEZ RUIZ, J. E., L. PINO RIVERO, C. ALEJANDRO ALFONSO y E. VALENCIA MORALES: "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):43-51, 1995.
- LEVELINK, H. G., F.D.M.A JULIEN & H.C.J DE MAN: "Defectos de fundición debidos a la formación de gases en moldes y machos", *Colada* 13 (7-9):168-174, 1980.
- LIASS, A. M.: "Estado actual y tareas del desarrollo en la URSS de los procesos tecnológicos de elaboración de moldes y machos", *Resúmenes de la XXVII Conferencia Científico-Técnica de Fundidores de la URSS*, Odesa, 1975.
- SALCINES MERINO, C. M.: "Higroscopicidad", en *Tecnología de fundición*, t. I, pp. 283-284, Ed. Pueblo y Educación, Habana, Cuba, 1985 a.
- : "Arenas y arcillas de moldeo", en *Tecnología de fundición*, t. I, pp. 52-57, Ed. Pueblo y Educación, Habana, Cuba, 1985 b.
- SIMS, C. E. & C. A ZAPFFE: "The Mechanism of Pinhole Formation", *Trans. Am. Fdry. Assoc.* 49:255-281, 1941.
- THURY, W. y H. SAGMEISTER: "Defectos en la aplicación de machos de caja fría y posibilidades de evitarlos", *Colada* 12 (4):63-68, 1979.
- TIJONOV, A. N. y A. A. SAMARSKY: *Ecuaciones de la Física Matemática*, 3. ed., Ed. Mir, Moscú, 1980.
- VALENCIA MORALES, E.: "Higroscopicidad en los revestimientos de los electrodos básicos y mezclas de moldeo para la fundición cubana", Tesis doctoral, Departamento de Física, Facultad de Matemática, Física y Computación, UCLV, Santa Clara, Cuba, 1992.
- VALENCIA MORALES, E., N. J. GALEANO ÁLVAREZ y M. RODRÍGUEZ GONZÁLEZ: "Influencia de la humedad ambiental en el mejoramiento de la calidad en las fundiciones de hierro", IX Forum de Ciencia y Técnica, Universidad Central de Las Villas, Cuba, 1994.