PRINCIPIOS DE TRANSPORTE DE FLUIDOS Y PROCESOS DE SOLIDIFICACIÓN METÁLICA EN DISPOSITIVOS TECNOLÓGICOS USADOS PARA LA FUNDICIÓN – COLADA

PRINCIPLES OF FLUID TRANSPORT AND METAL SOLIDIFICATION PROCESSES IN DEVICES TECHNOLOGICALS USED FOR COLADA FOUNDRY

Víctor Chura Uruchi*

RESUMEN

El presente artículo, hace una revisión sobre la **disposición tecnológica** usada en la fundición colada conforme a diseño que garantice el cambio de fase y sostenibilidad de este proceso perfeccionado sobre principios del transporte de fluidos: (líquidos en movimiento, llenado de una cavidad por tiempo); además del conocimiento específico sobre propiedades intensivas y extensivas de la materia, solidificación e intercambio de calor entre el metal fundido y el material de moldeo, el tiempo de solidificación, características de la contracción metálica, uso de enfriadores y diseño e implementación de mazarotas tratando variables de superficie y volumen.

Dominio cognoscitivo y tecnológico que ha permitido el desarrollo y crecimiento de la fundición colada, arraigando en el tiempo, procesos de manufactura de gran utilidad industrial y tecnológica.

PALABRAS CLAVES: Transporte de fluidos, punto de fusión, colada, bebedero, mazarotas.

ABSTRACT

This paper makes a review on technological layout used in the colada foundry, in accordance with design to ensure the phase shift and sustainability of this improved process on principles of fluid transport (moving liquids, filling a cavity by time, etc.) ; In addition to the specific knowledge on intensive and extensives properties of the matter, solidification and heat exchange between the molten metal and the molding material, the solidification time, characteristics of the metal shrinkage, use of chillers and design and implementation of feeders treating variables of surface and volume.

Cognitive and technological expertise who has enabled the development and growth colada foundry , consolidating in the time, manufacturing processes of great importance industrial and technological

KEYWORDS: Fluid transport, melting point, colada foundry, sprue, mazarotas.

RESUMO

O presente artigo, faz uma revisão sobre a disposição tecnológica utilizada da fundição metálica de acordo com o projeto que garante a mudança de fase e sustentabilidade deste processo aperfeiçoado em princípios do transporte de fluidos: (líquidos em movimento, preenchimento de uma cavidade por tempo) ; além do conhecimento específico de propriedades intensivas e extensivas da matéria, solidificação e troca de calor entre o metal fundido e o material de moldagem, o tempo de solidificação, características do encolhimento metal, uso de chillers (enfriadores) e concepção e implementação de sprues (mazarotas) tentando variáveis de superfície e volume.

Domínio cognitivo e tecnológico que permitiu o desenvolvimento e crescimento da fundição metálica, enraizando no tempo, processos e manufaturas de grande utilidade industrial e tecnológica.

PALAVRAS-CHAVE: Transporte de fluido, ponto de fusão, colada, bebedero, mazarotas.

History of the article: Received 10/05/2018. Style review 25/05/2018. Accepted 15/06/2018.

INTRODUCCIÓN

En todo proceso de fundición y colada[1], el metal fundido (líquido), fluye por gravedad u otra fuerza dentro de un molde donde se solidifica y adquiere la forma de su interior, siendo importante para que el proceso transcurra sin dificultades, tomar en cuenta variables:

- Cinéticas y de transporte de fluidos: donde la velocidad de vaciado[2] y el caudal de vertido del metal fundido al interior del molde también son significativas para la fundición.
- Energéticas y diseño de mazarotas: donde la transferencia de calor entre el metal fundido en el proceso de enfriamiento y solidificación al interior del molde debe disiparse primero en la pieza a reproducir y después en las mazarotas, compensando así la contracción y el rechupe).

Bajo esta perspectiva, en el presente artículo se efectúa una breve descripción sobre la disposición tecnológica usada en la fundición colada conforme a diseño que garantice el cambio de fase y sostenibilidad de este proceso, perfeccionado sobre principios del transporte de fluidos: (líquidos en movimiento, llenado de una cavidad por tiempo); además del conocimiento específico sobre propiedades intensivas y extensivas de la materia, solidificación e intercambio de calor entre el metal fundido y el material de moldeo, tiempo de solidificación, características de la contracción metálica, uso de enfriadores y diseño e implementación de mazarotas tratando variables de superficie y volumen.

[1] El término fundición se aplica también a la parte resultante de este proceso. Es uno de los más antiguos procesos de formado que se remonta seis mil años atrás.

[2] Si la velocidad es muy lenta, el metal puede enfriarse antes de llenar la cavidad. Si la velocidad de vaciado es excesiva provoca turbulencia y puede convertirse en un problema serio (se favorece la erosión de la arena del molde, así como que el metal atrape gases y escoria).

DESARROLLO

Cálculo de la energía calorífica, proceso de colada

Para llegar a fundir un metal, éste debe tener un cambio de fase, es decir, pasar desde el estado sólido al líquido ganando calor a partir de un foco calórico por lo general (horno de fundición). En consecuencia, para determinar la cantidad de energía demandada para este cambio de fase se tiene la siguiente expresión:

$$H = \rho V\,[c_s\,(T_f - T_0) + c_l\,(T_p - T_f) + H_f] \qquad (1)$$

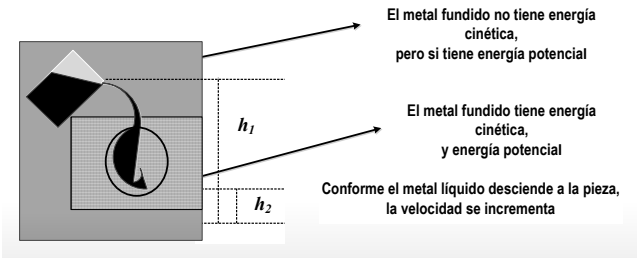
H = calor total para fundir el metal a temperatura de vaciado (J), ρ = densidad del metal (g.cm^{-3}), V = volumen (cm^3), c_s = calor específico del metal sólido (J.g^{-1}.ºC^{-1}), c_l = calor específico del metal líquido (J.g^{-1}.ºC^{-1}), T_o = temperatura ambiente (ºC), T_f = temperatura de fusión (ºC), T_v = temperatura de vaciado (ºC), H_f = Calor latente de fusión ((J.g^{-1})

Una vez alcanzada la temperatura correcta para producir una pieza de calidad, el metal fundido y sobrecalentado por encima de su punto de fusión, está preparado para ingresar en el interior de los moldes, operación llamada vaciado, que se refiere al ingreso del metal fundido y su derrame antes de solidificarse en el interior del molde en función del diseño de la cavidad. Por lo tanto los factores que deben controlarse en el vaciado son la: temperatura y velocidad de vaciado, aparte de la turbulencia producida al llenar el molde.

Proceso de vaciado

El metal fundido (líquido) como todo fluido newtoniano en movimiento se relaciona con el teorema de Bernoulli, estableciendo que la suma de las energías (altura, presión dinámica, energía cinética y presión) en dos puntos cualesquiera de un líquido que fluye, son iguales.

La figura 1, representa el teorema de Bernoulli aplicado a los puntos 1 y 2 del sistema, (vaciado de metal fundido).



Fuente: Elaboración propia

Figura 1: Aplicación componentes Bernoulli, vaciado de un metal fundido

$$h_1 + P_1(\rho g)^{-1} + v^2_1(2g)^{-1} + F_1 = h_2 + P_2(\rho g)^{-1} + v^2_2(2g)^{-1} + F_2$$

h = altura (m),
P = presión del líquido (N.m^{-2}),
ρ = densidad (kg.m^{-3}), g = aceleración de la gravedad (m.s^{-2}),
v = velocidad del flujo (m.s^{-1}),
F = pérdidas por fricción (m)

Igualdad que puede reducirse, considerando que no hay pérdidas por fricción $F = 0$, y que el vaciado se efectúa a la misma presión constante $P_1 = P_2$:

$$h_1 + v^2_1(2g)^{-1} = h_2 + v^2_2(2g)^{-1}$$

Expresión que en función de la altura del bebedero h_1 puede utilizarse para determinar la velocidad del metal fundido v_2 en la base del bebedero de colada:

$$v_2 = (2gh_1)^{0,5} \qquad (2)$$

v_2 = Velocidad del metal líquido en la base del bebedero (cm.s^{-1}),
h_1 = Altura del bebedero (cm)

Por otra parte aplicando la ley de continuidad se puede establecer que el caudal o velocidad volumétrica del flujo permanece constante a través del líquido:

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \qquad (3)$$

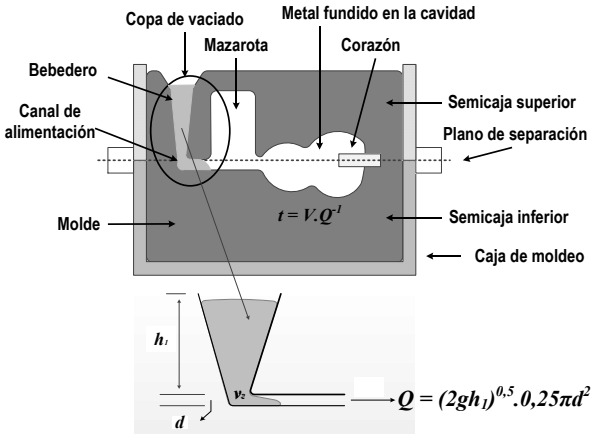
Q = Velocidad de flujo volumétrico o caudal (cm^3.s^{-1})
v = Velocidad de un punto de la masa de metal fundido (cm.s^{-1})
A = Área de una sección transversal del metal líquido (cm^2)

Por lo general el bebedero o conducto vertical del sistema de vaciado tiene forma cónica invertida para evitar que el metal líquido al incrementar su velocidad, atrape aire. De esta manera el canal alimentador base del bebedero en conexión con la cavidad del molde debe ser horizontal y mantener una mínima altura por donde fluye el metal líquido hasta la cavidad del molde (ver figura 2). Tomando en cuenta la velocidad que adquiere el metal fundido en la base del bebedero después de recorrer una determinada altura h_1, por encima de una abertura del canal alimentador equivalente a un orificio circular de diámetro d, de área igual a $(0,25\pi d^2)$, para establecer ajustando las expresiones 2 y 3 el caudal o flujo volumétrico requerido:

$$Q = (2gh_1)^{0,5}.\ 0,25\pi d^2 \quad [\text{cm}^3.\text{s}^{-1}]$$

Por otra parte esta disposición permite determinar el tiempo t, requerido para llenar una cavidad de volumen V. Relacionando el caudal con este volumen:

$$t = V.Q^{-1}$$



Fuente: Elaboración propia, sobre esquema de [1]

Figura 2: Disposición del bebedero y movimiento del metal fundido para determinar el caudal y el tiempo de llenado, molde vertical

Enfriamiento y solidificación

Después de vaciar el metal fundido en el molde, este debe disminuir su temperatura para volver al estado sólido pero con apariencia en réplica del molde. Las variables y parámetros asociados con el enfriamiento y solidificación[3] incluyen: tiempo de enfriamiento del metal, la contracción, la solidificación, las direcciones y el diseño de mazarotas.

Tiempo total de solidificación *TST*

La Regla de Chvorinov, establece que el tiempo total de solidificación de la fundición después del vaciado depende del tamaño y forma de la pieza. Según la relación:

$$TST = C_m . V^n . A^{-n}$$

TST = Tiempo de Solidificación Total (min)
V = volumen de la fundición (m^3),
A = área superficial de la fundición (m^2)
n = exponente de valor 2 generalmente
Cm = constante del molde (min.m^{-2})

Esta regla es útil para el diseño de la mazarota[4] en su función de alimentar metal líquido que llegue hasta la cavidad principal. Por lo que el metal en la mazarota debe permanecer en fase líquida y terminar su solidificación después del solidificado de la pieza principal.

Para cumplir con esta condición, el diseño de mazarotas debe aplicar una relación de volumen a área superficial más grande, que permite a la fundición principal solidificar primero y reducir así la contracción (rechupe).

Contracción

El descenso de temperatura durante el enfriamiento del metal fundido, hace que la altura del líquido se reduzca desde el nivel inicial, se produce en tres etapas: 1) contracción líquida durante el enfriamiento anterior a la solidificación, 2) Contracción durante el cambio de fase líquido a sólido o (contracción de solidificación, y 3)

[3] La solidificación involucra el regreso del metal a estado sólido, y se diferencia entre un metal puro o una aleación. **Metales Puros:** solidifica a una temperatura constante que constituye su punto de fusión. **Aleaciones:** solidifican generalmente en intervalos de tiempo y a una temperatura definida, el rango depende del sistema de aleación y de su composición en particular.

[4] Partes del molde que contienen metal líquido necesario para poder compensar los efectos de contracción liquida y solidificación.

contracción de fundición solidificada durante el enfriamiento hasta la temperatura ambiente, que presenta cavidades caracterizadas por superficies irregulares, comúnmente denominadas rechupes.

Diseño de mazarota

La mazarota en un molde de fundición, equivale a un volumen mayor de metal líquido confinado en un sector del molde para adicionar cantidades pequeñas de metal fundido durante el enfriamiento y así, compensar la contracción (rechupe) que tiene el metal al solidificarse.

En consecuencia, para el diseño de mazarotas es preciso calcular su módulo por la relación $(V_M.A_M^{-1})$, pero antes de conocer el módulo de la mazarota M_M, hay que determinar el módulo de la pieza que alimenta M_P, relación $(V_P.A_P^{-1})$. El volumen V_P es la magnitud que está más al alcance de ser calculada aun aproximadamente. A diferencia del área A_P, especialmente en el caso de piezas complejas.

Una buena aproximación para calcular las dimensiones de la mazarota se consigue al aplicar la regla de Chvorinov, o desigualdad entre módulos de enfriamiento:

$$C_m \,.\, M_M \geq C_m \,.\, M_P$$

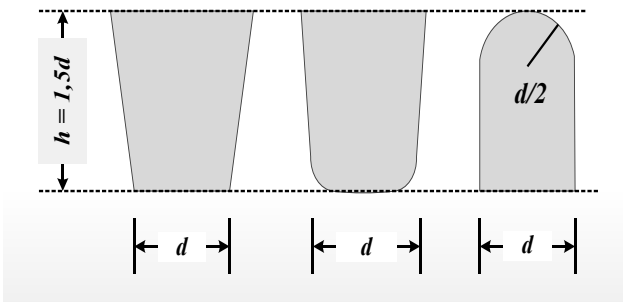
$$C_m \,.\, V_M \,.\, (A_M)^{-1} \geq C_m \,.\, V_P \,.\, (A_P)^{-1}$$

C_m = constante del molde,
V_M = volumen de la mazarota (m^3),
A_M = área de la mazarota (m^2),
V_P = volumen de la pieza (m^3),
A_P = área de la pieza (m^2).

Obtenido el módulo de enfriamiento M_P, éste puede servir para evaluar M_M. Fijando las dimensiones y forma de la mazarota que aporte con el mayor módulo de enfriamiento posible, en equivalencia con el mismo volumen de metal. Adoptando para la mazarota, la forma cilíndrica (variables altura h y el diámetro d), así el módulo M_M, corresponde a:

$$M_M = V_M \,.\, (A_M)^{-1} = dh.(4h+2d)^{-1}$$

Aplicable en el rango de 1 a 1,5 para la relación de forma cilíndrica $h = 1{,}5d$. La figura 3, muestra diferentes formas de mazarotas conservando la relación mencionada.



Fuente: Elaboración propia, sobre información de [2]

Figura 3: Diferentes formas de mazarotas conservando la relación forma cilíndrica $h = 1{,}5d$

Enfriadores

El trabajo de las mazarotas puede mejorar, adicionando enfriadores. El espesor del enfriador debe ser por lo menos igual al doble del módulo de enfriamiento de la pieza.

Tiempo de colada con mazarota

El tiempo de una colada considerando la masa total que será depositada al interior de la cavidad del molde y los espesores de la pieza a reproducir (masa hasta 450 kg y espesores de 0,25 a 1,5 cm) se puede determinar por la expresión:

$$t = s\,(M)^{0,5}$$

t = duración de la colada (s),
s = 1,68 para espesores que van de 0,25 a 0,35 cm, s = 1,85 para espesores que van de 0,35 a 0,8 cm, s = 2,2 para espesores que van de 0,8 a 1,5cm, M = masa de la pieza y la mazarota (kg).

CONCLUSIONES

Para lograr fundiciones colada, de metales o aleaciones, conforme a diseño y que garanticen el cambio de fase y su sostenibilidad durante el proceso, es importante que los moldes estén provistos de un sistema de alimentación conformado por: el bebedero, los canales de alimentación, las mazarotas, enfriadores y cavidades de moldeo. Disposición tecnológica respaldada sobre principios y variables del transporte de fluidos: (teorema de Bernoulli, líquidos en movimiento, vaciado, tiempo de llenado de una cavidad), y el conocimiento específico sobre las propiedades intensivas y extensivas de la materia, la solidificación e intercambio de calor entre el metal fundido y el material de moldeo, el tiempo de solidificación, las características de contracción, uso de enfriadores y el diseño e implementación de mazarotas tratando variables de área y volumen.

Dominio cognoscitivo y tecnológico que ha permitido el desarrollo y crecimiento de la fundición colada en moldes de arena y otros materiales moldeables, arraigando en el tiempo, procesos de manufactura de metales y aleaciones de gran utilidad industrial y tecnológica.

BIBLIOGRAFÍA

Groover, M.,1997, Fundamentos de manufactura moderna, Ed. Prentice Hall, México,

Astigarra Urquiza, J. 1995, Hornos de arco para fusión de acero, serie McGraw – Hill, Madrid – España,

Batista, C. A., Navas, M. E., 2002, Propiedades de fundición de metales y aleaciones,

Mayk, C. N., 1998, Sistema de alimentación para modificación en el molde, Nº 11,

Morral, F. R., 1995, Metalurgia General. Editorial Reverté, Barcelona – España,

Cembrero, C. J., et-al, 2005, Ciencia y tecnología de los materiales, Ed. Pearson – Prentice Hall, Madrid – España,

Capello, E., 1974, Tecnología de la fundición, Ed. Gustavo Gili S.A., Barcelona – España.

Referencias bibliográficas:

[1] Ortiz, P.A., Ruiz, C. O., Ortiz, V. JA, 2013, UNAM, Facultad de ingeniería, Cap. 2: Fundición de colada, PDF, México,

[2] Serrano, R., Tema 8: Diseño de las mazarotas, Universidad de Málaga – España, www.raquelserrano.com/?dl_id=314, PDF, Consulta: 03/06/18.

(*), Licenciado en Mecánica Industrial,
Docente carrera de Mecánica Industrial,
Facultad de Tecnología – UMSA.