

ACERO MOLDEADO OBTENIDO POR CENTRIFUGACIÓN CENTRIFUGAL CASTING STEEL

David Valle

Ingeniero Industrial. Licenciado en Administración y Dirección de Empresas
Jefe de Fábrica de Metalúrgica Madrileña, S.A.

RESUMEN

Se presenta la fundición centrífuga como una opción ventajosa para la fabricación de determinadas piezas de acero. El uso de manera controlada de la fuerza centrífuga permite la obtención de piezas complejas de revolución con una elevada calidad metalúrgica y a un precio competitivo, como pueden ser ruedas, platos de electroimán, poleas, etc.

ABSTRACT

The centrifugal casting is presented as an advantageous option for manufacturing steel parts. The use of a controlled centrifugal force allows to obtain complex steel parts, such as wheels, pulleys, electromagnet plates, etc., with high quality degree and competitive cost.

INTRODUCCIÓN

El acero es el material más versátil disponible en la actualidad. El acero puede ser soldado, fácilmente mecanizado, y permite su utilización en las más diversas aplicaciones. Se puede utilizar ventajosamente allí donde se requiera una elevada resistencia mecánica, resistencia al desgaste y/o a la corrosión, a elevadas o bajas temperaturas, etc., con una excelente relación calidad precio.

El acero moldeado se caracteriza principalmente porque el método de producción permite obtener productos de formas complicadas directamente con la forma final, eliminando la mayor parte del mecanizado y las complejas y caras composiciones soldadas. Ello se traduce en una reducción notable del coste final de la pieza.

El proceso de fabricación de piezas acero por fundición centrífuga se basa en la colada en un molde giratorio (proceso dinámico), en el cual la fuerza centrífuga, muy superior a la presión atmosférica y a la presión metalostática, y perfectamente controlable en cada momento, permite la obtención de piezas con una calidad muy superior a los métodos convencionales.

Frente a la forja, el acero moldeado es más favorable para el diseñador por dos razones: La posibilidad de obtener formas complejas, imposibles de abordar mediante la forja, y la versatilidad metalúrgica posible con el acero moldeado centrífugo. Además la necesidad de fabricar matrices hace inviable económicamente la forja de pocas unidades.

ALIMENTACIÓN DE PIEZAS DE ACERO MOLDEADO

El acero, como casi todos los materiales, sufre una disminución de volumen, una contracción, desde el momento que se funde, a la temperatura de colada, hasta que se encuentran totalmente solidificados. Esta disminución de volumen se produce tanto durante el periodo de enfriamiento en fase líquida como

durante el periodo que transcurre durante la solidificación hasta que esta se completa.

Si no se produjera una adecuada alimentación de la pieza que compensase esta contracción el resultado serían las cavidades conocidas como **rechupes**.

Por lo tanto, para evitar el rechupe, es necesario suministrar a las piezas que se están solidificando el material necesario para compensar la contracción volumétrica que se está produciendo.

El **sistema de colada** tiene la función de garantizar el flujo de acero fundido a la pieza para conseguir su llenado, además de funciones tales como evitar la turbulencia en el flujo líquido, evitar la erosión del molde y la aspiración de gases, eliminar inclusiones, establecer gradientes favorables de temperatura, favorecer el barrido del metal y controlar la velocidad de entrada del mismo al molde. Cuando se ha estudiado el trazado más idóneo y se han dispuesto las precauciones oportunas para conseguir en el molde una solidificación lo más dirigida posible, el único recurso de que dispone el fundidor para la alimentación adecuada de las piezas son las **mazarotas**.

Las **mazarotas** son depósitos de metal situados en lugares oportunos de la pieza que suministran caldo a la misma conforme esta se va enfriando y contrayendo, y recogen en su seno el rechupe.

El funcionamiento de las mazarotas depende fundamentalmente de dos factores:

La presión ferrostática, que se mantiene prácticamente constante

La presión atmosférica, de efectos desiguales

Estas dos presiones son de pequeña magnitud y de acción irregular, por lo que su efecto solo se hace sentir en las proximidad inmediata de la mazarota (por motivos de viscosidad, rozamiento interno, etc.), lo que obliga a aumentar su número.

Además el mazarotaje solo es eficaz hasta ciertos límites. Frecuentemente no es posible alimentar directamente determinadas partes de la pieza, como consecuencia de su situación o masividad. Además el empleo de mazarotas supone un incremento en el costo, por la disminución del rendimiento, el uso de costosos manguitos, mano de obra para la preparación de los moldes y por las posteriores operaciones de repasado, etc.

Una mala práctica de llenado puede dar lugar a numerosos defectos, entre los que se puede citar:

- 4 Grietas y rechupes
- 4 Faltas de llenado o juntas frías
- 4 Arrastres, darts
- 4 Inclusiones no metálicas (gas, arena, escoria)

FUNDICIÓN CENTRIFUGADA VERTICAL

La colada por centrifugación consiste en que el material líquido se vierte en un molde que gira a una velocidad determinada. Al caer el material en el molde se ve arrastrado por las paredes del mismo, experimentando un movimiento giratorio y, en consecuencia, la acción de la fuerza centrífuga, que le proyecta

contra las paredes más alejadas del eje de rotación, donde se comprime y solidifica.

Según sea el eje de rotación del molde vertical, horizontal o inclinado, así nos encontraremos ante **centrifugación vertical, horizontal o inclinada**.

La centrifugación vertical pone a disposición del fundidor una fuerza radial de valor variable, pero controlable en todo momento y en cada punto de la pieza, que proporciona una elevada presión de alimentación y una solidificación dirigida.

La mazarota se situará en el interior de la pieza, de forma normalmente cilíndrica, y cuya actuación se verá mejorada por la acción de la fuerza centrífuga, lo que proporcionará un mejor rendimiento.

Como la alimentación y fluidez está garantizada por la fuerza centrífuga, se puede fundir a menor temperatura y se hacen innecesarias las mazarotas exteriores, lo que provoca una textura de solidificación más fina y una cristalización más regular.

Debido al favorable gradiente térmico en conjunción con la acción de la fuerza centrífuga sobre el metal fundido, cada sucesivo incremento de metal solidificado se alimenta por el metal líquido en contacto con el mismo hasta que la solidificación se completa. Así se consigue eliminar la porosidad y obtenemos una solidificación direccional desde la pared exterior y un crecimiento de grano típicamente columnar. (Ver fig. 1)

NOCIONES TEÓRICAS

Si se considera un molde cerrado rotando en torno a un eje interno, el cálculo muestra que un líquido introducido en el mismo, sometido a la misma velocidad de rotación del molde, dará lugar a la formación de un volumen limitado exteriormente por las paredes del molde e interiormente por un paraboloides (fig 2).

Así la presión hidrostática en el punto M será (2) (considerando que el líquido no tiene movimiento relativo respecto al molde), y partiendo de la ecuación fundamental de equilibrio de la hidrostática (Euler) :

$$p = \rho \left(\frac{\omega^2 x^2}{2} - gz \right) + c$$

Donde ω es la velocidad angular constante que tiene el sistema, x y z las coordenadas del punto M, g la aceleración de la gravedad y c una constante.

Haciendo $p = \text{constante}$ obtenemos las curvas de presiones iguales:

$$\frac{\omega^2 x^2}{2} - gz = D$$

Ecuación que se corresponde a una parábola con el eje vertical y parámetro $\frac{g}{\omega^2}$

Luego las superficies de presiones iguales (superficies de niveles) son paraboloides de revolución.

La apertura de este paraboloides es máxima en el caso de eje de rotación vertical y decrece a medida que la inclinación del eje aumenta. La centrifugación sobre eje horizontal puede dar lugar, por encima de una velocidad crítica, a una cavidad cilíndrica.

En la fundición estática, cuando el molde se funde bajo la acción exclusiva de la fuerza de la gravedad (véase fig. 3 con el llenado de una rueda) el llenado del mismo se realiza progresivamente de abajo a arriba y la posterior solidificación del acero se realiza progresivamente partiendo de las paredes y del fondo, progresando hasta que por último, y tras cumplir su misión de alimentación, solidifica el caldo presente en las mazarotas.

En la colada de la misma rueda centrifugada (fig. 3), al ser proyectado el caldo por acción de la fuerza centrífuga, el molde se va llenando progresivamente del exterior al interior, siguiendo un frente con la forma de paraboloides indicada. La solidificación asimismo se produce del exterior al interior, siguiendo un frente de solidificación con la forma asimismo de un paraboloides, aunque afectado por el efecto de enfriamiento de las paredes del molde, hasta que la pieza queda completamente solidificada. La acción de la fuerza centrífuga permite colar a una menor temperatura, y la mayor homogeneidad de las masas favorecerá la consecución de una estructura más homogénea y evitar las tensiones internas que se producen en la pieza en el proceso de colada bajo la acción exclusiva de la gravedad.

La ley de distribución de presiones en el metal líquido, siendo $\gamma = \rho \cdot g$ el peso específico, es la siguiente (2):

$$p = p_0 + \gamma (h-z) + \frac{\gamma \omega^2}{4g} (2x^2 - R^2)$$

De la que se deduce que para los puntos que se encuentran en la misma horizontal ($z=\text{cte}$), las presiones crecen proporcionalmente al cuadrado de su distancia al eje, y los puntos situados en una misma superficie cilíndrica ($x=\text{cte}$) las presiones varían proporcionalmente a la distancia tomada sobre la normal a la superficie libre.

La presión provocada por la velocidad angular empuja a las partículas más livianas (inclusiones de escoria, arena, etc.) hacia la superficie libre, alejándolas de la pieza y favoreciendo por tanto un material más sano.

Para fijar la velocidad de rotación se habla de "g"s, o número de veces que la fuerza centrífuga que se ejerce sobre el metal fundido contiene a la fuerza de la gravedad. De esta forma se garantiza una adecuada selección de la velocidad de rotación para que, en función del diámetro de la pieza a fundir, se consiga alcanzar en el metal la presión deseada. Se suele fijar para moldes de arena una presión de 10g en la periferia de la pieza, la cual se alcanza aumentando progresivamente la velocidad de rotación desde 50 r.p.m., velocidad a la que se funde, hasta la velocidad correspondiente a los 10 g deseados. La velocidad de rotación será tanto menor cuanto mayor sea el diámetro de la pieza para la misma presión en la periferia de la misma. A medida que se incrementa la velocidad angular el paraboloides tendrá un aspecto más alargado.

Para ampliar los fundamentos teóricos del colado por centrifugación acúdase a las referencias (1) y (2).

MATERIALES Y TRATAMIENTOS

La colada por centrifugación puede utilizarse para prácticamente todos los tipos de acero moldeado, aunque los más habituales son los aceros moldeados de baja aleación (Norma UNE 36255).

Las piezas pueden presentarse en estado de bonificado (temple y revenido), mecanizadas en una sola fase, o con un temple superficial posterior y mecanizadas en dos fases. La realización de un temple superficial permite obtener pieza con una elevada dureza en la parte exterior de la misma, donde va a estar sometida a mayores desgastes, junto con una elevada tenacidad en el núcleo de la misma.

Véase tabla I

APLICACIONES

Las indudables ventajas que presenta la fundición centrifugada la hace insustituible en aquellos casos en los que se requieran elevadas características mecánicas y una óptima calidad junto con unos costes razonables, y siempre que la geometría de la pieza lo permita. Así podemos citar:

- a) Piezas con espesores pequeños que no pueden ser abordados por la colada estática de manera sencilla
- b) Cuando los rechazos en moldeo estático por arrastres de arena, inclusiones, erosiones en el macho central, etc., sean elevados.
- c) Cuando para obtener la pieza sea necesario el uso de mazarotas que incrementarían su precio y disminuirían notablemente su rendimiento.
- d) Cuando se pretenda una estructura periférica regular.
- e) Cuando se busque evitar los problemas que plantea la contracción después de la solidificación (grietas, fisuras, ovalización, etc.)

Así podemos reseñar como ejemplos típicos de aplicación de la fundición centrifugada: Ruedas, poleas, platos de electroimán, etc. (fig. 4 con algunos ejemplos)

CONCLUSIÓN

La colada centrífuga, y concretamente la de eje vertical, gracias a la acción de la fuerza centrífuga, permite abordar la realización de piezas de revolución con espesores delgados, consiguiendo una estructura fina y homogénea, eliminando muchos de los defectos que son habituales en la fundición estática, obteniendo piezas de una gran calidad a un precio muy razonable, gracias a la importante mejora del rendimiento, eliminación de mazarotas, disminución de las tareas de rebarba, etc., que permiten compensar el precio del modelaje para series muy cortas, por lo que resulta de gran interés en la fabricación de ruedas, poleas, etc.

Bibliografía:

- 1- "Centrifugal Casting". Nathan Janco. American Foundrymen's Society Inc. Des Plaines, Illinois, USA 1992.
- 2- "Fundición Centrifugada. Hierro - Vidrio – Hormigón". Nicolás P. Waganoff. Librería y Editorial Alsina. Buenos Aires 1958.
- 3- "Acero Moldeado Obtenido por Centrifugación". Francisco de Lacalle Leloup. Anales de Mecánica y Electricidad. Septiembre – octubre 1969. Madrid.
- 4- "Ideas Prácticas sobre Sistemas de Colada". José Luís Enriquez. Rev. Fundidores. Setiembre 1996
- 5- "Steel Castings Handbook". Harol Amland y otros. ASM International. USA 1995.
- 6- Fotografías obtenidas por cortesía de Metalúrgica Madrileña, S.A.

FIGURAS

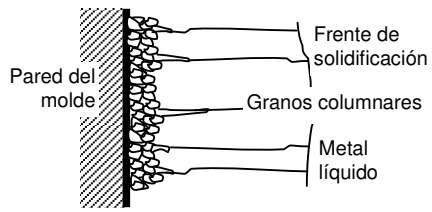


Fig. 1: Crecimiento de grano columnar

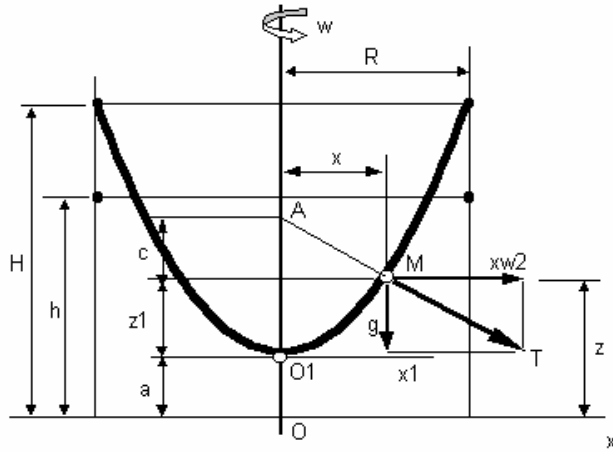


Fig. 2: Paraboloido

TABLA 1 Aceros moldeados de baja aleación de uso en centrifugación**Norma UNE 36255****Composiciones**

Simbólica	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%S máx	%P máx
AM34CrMo4	0'30-0'38	0'5-0'8	0'3-0'5	0'8-1'2		0'15-0'30	0'04	0'04
AM35NiCrMo16	0'32-0'36	0'40-0'50	0'20-0'60	1'00-1'20	3'80-4'20	0'35-0'45	0'025	0'025
AM42CrMo4	0'38-0'45	0'5-0'8	0'3-0'5	0'8-1'2		0'15-0'3	0'04	0'04
AM30NiCrMo7	0'27-0'34	0'5-0'8	0'3-0'5	0'6-0'9	1'8-2'00	0'2-0'4	0'04	0'04

Características mecánicas en estado de temple y revenido entre 550° y 650°

Simbólica	Re (mín)	Rm	A %	ρ
AM34CrMo4	590	785-930	9	3
AM35NiCrMo16	900	1100-1300	6	6
AM42CrMo4	685	930-1030	7	2
AM30NiCrMo7	735	930-1030	9	4

TABLA 2 Aceros moldeados no aleados**Norma UNE 36255**

Simbólica	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%S máx	%P máx
AM60	0'35-0'45	0'4-0'8	0'3-0'6	0'8-1'2			0'05	0'05

Propiedades mecánicas a temperatura ambiente en estado de normalizado

Simbólica	Re (mín)	Rm (mín)	A %	ρ
AM60	295	590	15	1'5

Re: Límite elástico aparente (N/mm²)

Rm: Resistencia a la tracción (N/mm²)

A: Alargamiento (%)

ρ: Resiliencia (Kgfm/cm²)

Situación de las figuras:

Figura 1: Crecimiento de grano columnar: página 3

Figura 2: Paraboloide: página 3

Figura 3: Fundición estática vs. Fundición centrifugada: página 4

Figura 4: Algunos ejemplos de piezas centrifugadas: páginas 5 ó 6. Pueden publicarse separados los diferentes ejemplos

Figura 5: Colada: Página 1 ó 2

Figura 6: Control de Calidad: página 4 ó 5