

2.2.2 FUNDICIÓN CENTRÍFUGA

La fundición centrífuga se refiere a varios métodos de fundición caracterizados por utilizar un molde que gira a alta velocidad para que la fuerza centrífuga distribuya el metal fundido en las regiones exteriores de la cavidad del dado. El grupo incluye: 1) fundición centrífuga real, 2) fundición semicentrífuga y 3) fundición centrifugada o centrifugado.

Fundición centrífuga real En la fundición centrífuga real, el metal fundido se vacía en un molde que está girando para producir una parte tubular. Ejemplos de partes hechas por este proceso incluyen tubos, caños, manguitos y anillos. Este método se ilustra en la figura 2.13. El metal fundido se vacía en el extremo de un molde rotatorio horizontal.

La rotación del molde empieza en algunos casos después del vaciado. La alta velocidad genera fuerzas centrífugas que impulsan al metal a tomar la forma de la cavidad del molde. Por tanto, la forma exterior de la fundición puede ser redonda, octagonal, hexagonal o cualquier otra. Sin embargo, la forma interior de la fundición es perfectamente redonda (al menos teóricamente), debido a la simetría radial de las fuerzas en juego.

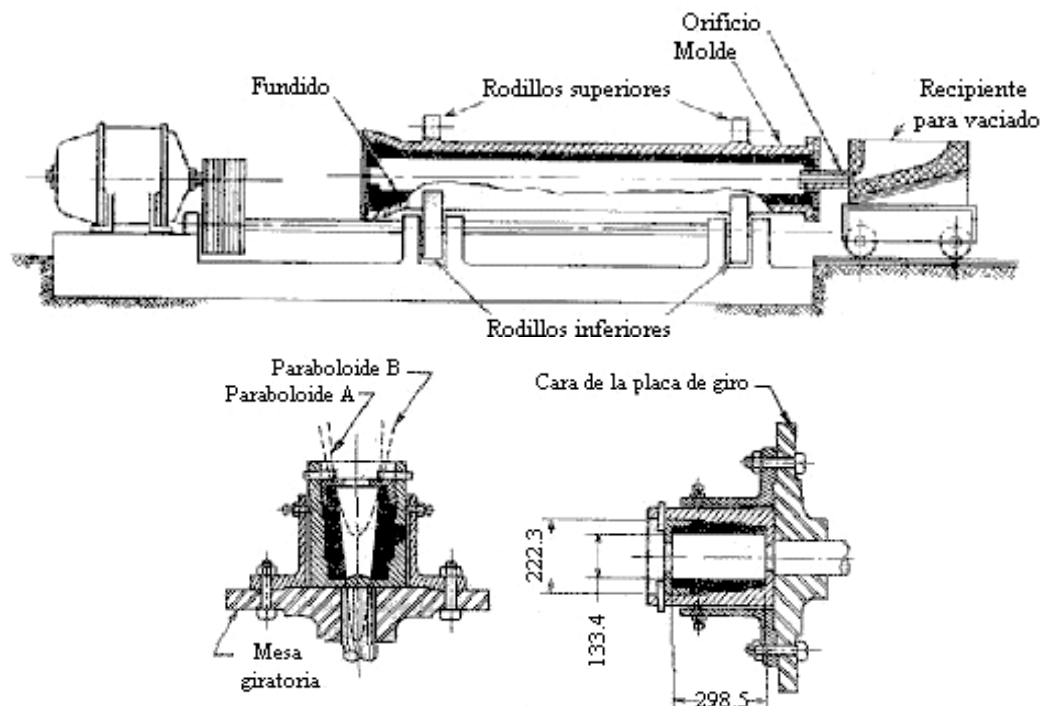


FIGURA 2.13 Disposición de la centrífuga real

La orientación del eje de rotación del molde puede ser horizontal o vertical, pero esta última es la más común. Para que el proceso trabaje satisfactoriamente se calcula la velocidad de rotación del molde en la fundición centrífuga horizontal. La fuerza centrífuga está definida por la ecuación:

$$F = \frac{mv^2}{R} \quad 2.8$$

$$GF = \frac{F}{W} = \frac{mv^2}{Rmg} = \frac{v^2}{Rg} \quad 2.9$$

Donde:

F = fuerza (N)

m = masa (Kg)

v = velocidad (m/s)

R = radio interior del molde (m)

$W = mg$ es su peso (N)

g = aceleración de la gravedad (m/s²)

El factor-G GF es la relación de fuerza centrífuga dividida por el peso

La velocidad v puede expresarse como $2\pi RN / 60 = \pi RN / 30$, donde N velocidad rotacional rev/min. Al sustituir esta expresión en la ecuación (2.9) obtenemos

$$GF = \frac{R\left(\frac{\pi N}{30}\right)^2}{g} \quad 2.10$$

Con un arreglo matemático para despejar la velocidad rotacional N y usando el diámetro D en lugar del radio, tenemos

$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2gGF}{D}} \quad 2.11$$

Donde:

D = diámetro interior del molde (m)

N = velocidad de rotación (rev/min)

Si el factor-G es demasiado bajo en la fundición centrífuga, el metal líquido no quedará pegado a la pared del molde durante la mitad superior de la ruta circular sino que “lloverá” dentro de la cavidad. Ocurren deslizamientos entre el metal fundido y la pared del molde, lo cual significa que la velocidad rotacional del metal es menor que la del molde. Empíricamente, los valores de $GF = 60$ a 80 son apropiados para la fundición centrífuga horizontal, aunque esto depende hasta cierto punto del metal que se funde

Ejemplo 2.4 Velocidad de rotación en la fundición centrífuga real

Se realizará una operación de fundición centrífuga real horizontal para hacer secciones de tubo de cobre de 0.3 m de longitud con un diámetro externo = 0.25 m y diámetro interno = 0.22 m ¿Qué velocidad de rotación se requiere, si se usa un factor-G de 65 para fundir la tubería?

Solución: El diámetro interno del molde $D =$ diámetro externo de la fundición $= 0.25$ m. Podemos calcular la velocidad rotacional requerida por medio de la ecuación (2.11) como sigue:

$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2 \cdot 9.81 \cdot 65}{0.25}} = 681.69 [\text{rev} / \text{min}]$$

En la **fundición centrífuga vertical** el efecto de la gravedad que actúa en el metal líquido causa que la pared de la fundición sea más gruesa en la base que en la parte superior. El perfil interior de la fundición tomará una forma parabólica. La diferencia entre el radio de la parte superior y del fondo se relaciona con la velocidad de rotación como sigue:

$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2gl}{R_i^2 - R_b^2}} \quad 2.12$$

Donde:

$L =$ longitud vertical de la fundición (m)

$R_i =$ radio interno de la parte superior de la fundición (m)

$R_b =$ radio interior en el fondo de la fundición (m).

Se puede usar la ecuación (2.12) para determinar la velocidad rotacional requerida para la fundición centrífuga vertical, dadas las especificaciones de los radios internos en la parte superior y en el fondo. De la fórmula se desprende que para igualar a R_i , y a R_b , la velocidad de rotación N tendría que ser infinita, lo cual desde luego es imposible. En la práctica es conveniente que la longitud de las partes hechas por fundición centrífuga vertical no exceda de dos veces su diámetro. Esto es satisfactorio para bujes y otras partes que tengan diámetros grandes en relación con sus longitudes, especialmente si se va a usar el maquinado para dimensionar con precisión el diámetro interior.

Las fundiciones hechas por fundición centrífuga real se caracterizan por su alta densidad, especialmente en las regiones externas de la pieza, donde F es más grande. La contracción por solidificación en el exterior del tubo fundido no es de consideración, debido a que la fuerza centrífuga realocaliza continuamente el metal fundido hacia la pared del molde durante la congelación. Cualquier impureza en la fundición tiende a ubicarse en la pared interna y puede eliminarse mediante maquinado si es necesario,

Fundición semicentrífuga En este método se usa la fuerza centrífuga para producir fundiciones sólidas en lugar de partes tubulares, como se muestra en la figura 2.14. La velocidad de rotación se ajusta generalmente para un factor-G alrededor de 15, y los moldes se diseñan con mazarotas que alimenten metal fundido desde el centro. La densidad del metal en la fundición final es más grande en la sección externa que en el centro de rotación. El centro tiene poco material o es de poca densidad. Por lo

regular el centro en este tipo de sistemas de fundición es maquinado posteriormente, excluyendo así la porción de más baja calidad. Los volantes y las poleas son ejemplos de fundiciones que pueden hacerse por este proceso. Se usan frecuentemente moldes consumibles o desechables en la fundición semicentrífuga, como sugiere nuestra ilustración del proceso.

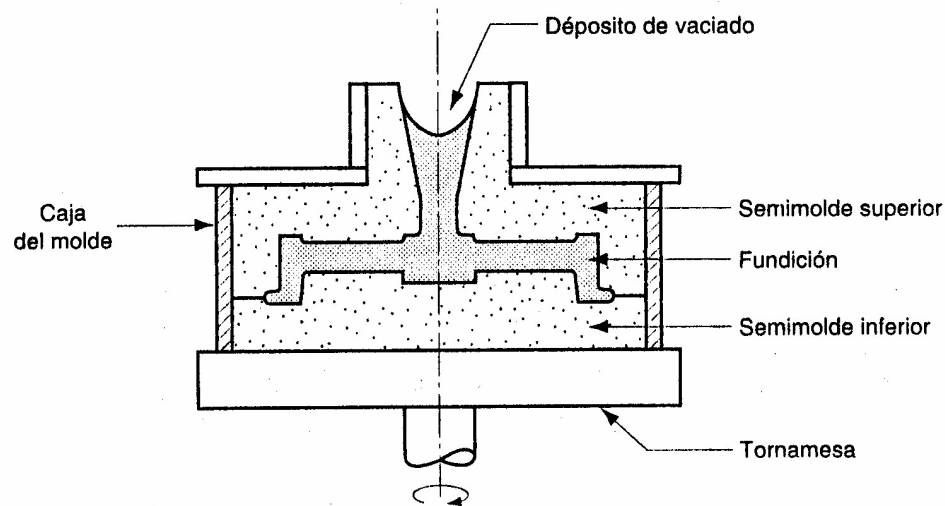


FIGURA 2.14 Fundición semicentrífuga

Fundición centrifugada Es un sistema donde por medio de un tallo se hace llegar metal fundido a racimos de cavidades colocadas simétricamente en la periferia (figura 2.15), de manera que la fuerza centrífuga distribuya la colada del metal entre estas cavidades. El proceso se usa para partes pequeñas, la simetría radial de la parte no es un requerimiento como en los otros dos métodos de fundición centrífuga.

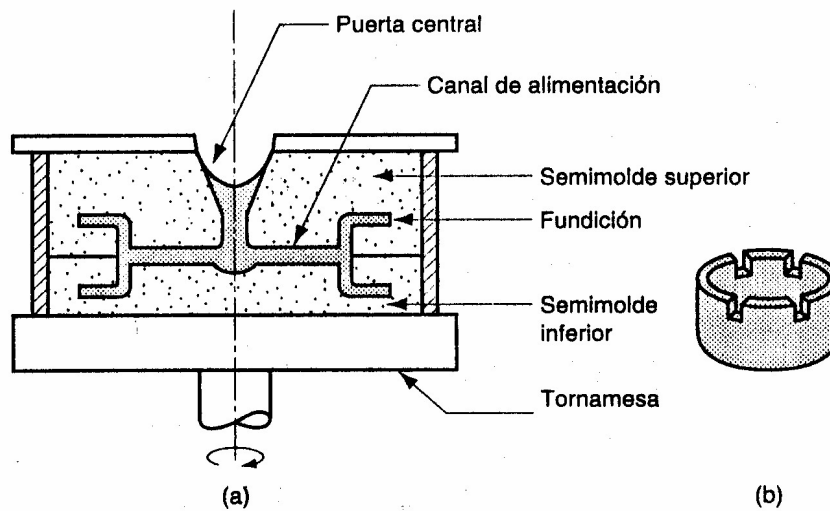


FIGURA 2.15 (a) Fundición centrifugada: la fuerza centrífuga hace que el metal fluya a las cavidades del molde lejos del eje de rotación y (b) la fundición.

2.2.3 FUNDICIÓN EN MOLDE DE YESO

La fundición con moldes de yeso es similar a la fundición en arena, excepto que el molde está hecho de yeso ($2\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$) en lugar de arena. Se mezclan aditivos como el talco y la arena de sílice con el yeso para controlar la contracción y el tiempo de fraguado, reducir los agrietamientos e incrementar la resistencia. Para fabricar el molde, se hace una mezcla de yeso y agua, se vacía en un modelo de plástico o metal en una caja de moldeo y se deja fraguar. En este método, los modelos de madera son generalmente insatisfactorios, debido al extenso contacto con el agua del yeso. La consistencia permite a la mezcla de yeso fluir fácilmente alrededor del patrón, capturando los detalles y el acabado de la superficie. Ésta es la causa de que las fundiciones hechas en moldes de yeso sean notables por su fidelidad al patrón.

El curado del molde de yeso es una de las desventajas de este proceso, al menos para altos volúmenes de producción. El molde debe dejarse fraguar cerca de 20 minutos antes de sacar el molde y, posteriormente, debe cocerse por varias horas para remover la humedad. Aun cocido, el yeso no se desprende de todo el contenido de humedad. El problema que enfrentan los fundidores es que la resistencia del molde se pierde cuando el yeso se deshidrata y, en el caso contrario, la humedad remanente puede causar defectos en el producto de fundición, por tanto es necesario encontrar un equilibrio entre estas alternativas indeseables. Otra desventaja del molde de yeso es que no es permeable limitando el escape de los gases de la cavidad del molde. Este problema puede resolverse de varias maneras: 1) evacuar el aire de la cavidad del molde antes de vaciar; 2) batir la pasta de yeso antes de hacer el molde, de manera que el yeso fraguado contenga pequeños poros dispersados; y 3) usar composiciones especiales del molde y un tratamiento conocido como *proceso Antioch*. Este proceso consiste en utilizar cerca de un 50% de arena mezclada con el yeso, calentar el molde en una autoclave (estufa que usa vapor sobrecalentado a presión), y después secar. El molde resultante tiene una permeabilidad considerablemente más grande que el molde de yeso convencional.

Los moldes de yeso no pueden soportar temperaturas tan elevadas como los moldes de arena. Por tanto, están limitados a fundiciones de bajo punto de fusión como aluminio, magnesio y algunas aleaciones de cobre. Su campo de aplicación incluye moldes de metal para plásticos y hule, impulsores para bombas y turbinas, y otras partes cuyas formas son relativamente intrincadas. Los tamaños de las fundiciones varían desde menos de una onza hasta varios cientos de libras; las partes que pesan menos de 20 lb son las más comunes. Las ventajas de los moldes de yeso para estas aplicaciones son su buen acabado superficial, su precisión dimensional y su capacidad para hacer fundiciones de sección transversal delgada.

2.2.4 FUNDICIÓN EN MOLDE DE CERÁMICA

Las fundiciones con moldes cerámicos son similares a las fundiciones con molde de yeso, el modelo se introduce varias veces en una lechada refractaria (yeso con polvo de mármol) la que cada vez que el modelo se introduce este se recubre de una capa de la mezcla, generando una cubierta en el

modelo. Posteriormente el modelo se extrae y luego el molde se introduce en un horno con lo que el material refractario se endurece. Así, los moldes cerámicos pueden usarse para fundiciones de acero, hierro y otras aleaciones de alta temperatura. Sus aplicaciones (moldes y piezas relativamente intrincadas) son similares a las de los moldes de yeso excepto por los metales que se funden. Sus ventajas (buena precisión y acabado) son también similares.

2.2.5 FUNDICIÓN EN MOLDE CON REVESTIMIENTO (MODELO PERDIDO)

Es un proceso muy antiguo para la fabricación de piezas artísticas. Consiste en la creación de un modelo en cera de la pieza que se requiere, este modelo debe tener exactamente las características deseadas en la pieza a fabricar. El modelo de cera es revestido (se cubre completamente) con yeso o un material cerámico que soporte el metal fundido. Luego el conjunto se introduce a un horno, con ello el material cerámico se endurece y el modelo de cera se derrite, obteniendo así el molde. En el molde fabricado se vacía el metal fundido y se obtiene la pieza deseada. Es un proceso de fundición capaz de hacer piezas de alta precisión e intrincados detalles y se conoce también como *fundición a la cera perdida*, debido a que el modelo de cera se pierde en el molde antes de fundirse.

Los pasos en la fundición por revestimiento se describen en la figura 2.16. Como los modelos de cera se funden después que se hace el molde refractario, se debe fabricar un modelo para cada fundición. La producción de modelos se realiza mediante una operación de moldeo, que consiste en vaciar o inyectar cera caliente en un dado maestro, diseñado con las tolerancias apropiadas para la contracción de la cera y del metal de fundición. En los casos donde la forma de la pieza es complicada, se juntan varias piezas de cera para hacer el patrón. En operaciones de alta producción se pegan varios patrones a un bebedero de colada, hecho también de cera, para formar un modelo de árbol, ésta es la forma que tomará el metal fundido.

El recubrimiento con refractario (paso 3) se hace generalmente por inmersión del árbol patrón en un lodo de sílice u otro refractario de grano muy, fino (casi en forma de polvo) mezclado con yeso que sirve para unir el molde. El grano fino del material refractario provee una superficie lisa que captura los intrincados detalles del modelo de cera. El molde final (paso 4) se forma por inmersiones repetidas del árbol en el lodo refractario o por una compactación cuidadosa del refractario alrededor del árbol en un recipiente. El molde se deja secar al aire, aproximadamente ocho horas, para que endurezca el aglutinante.

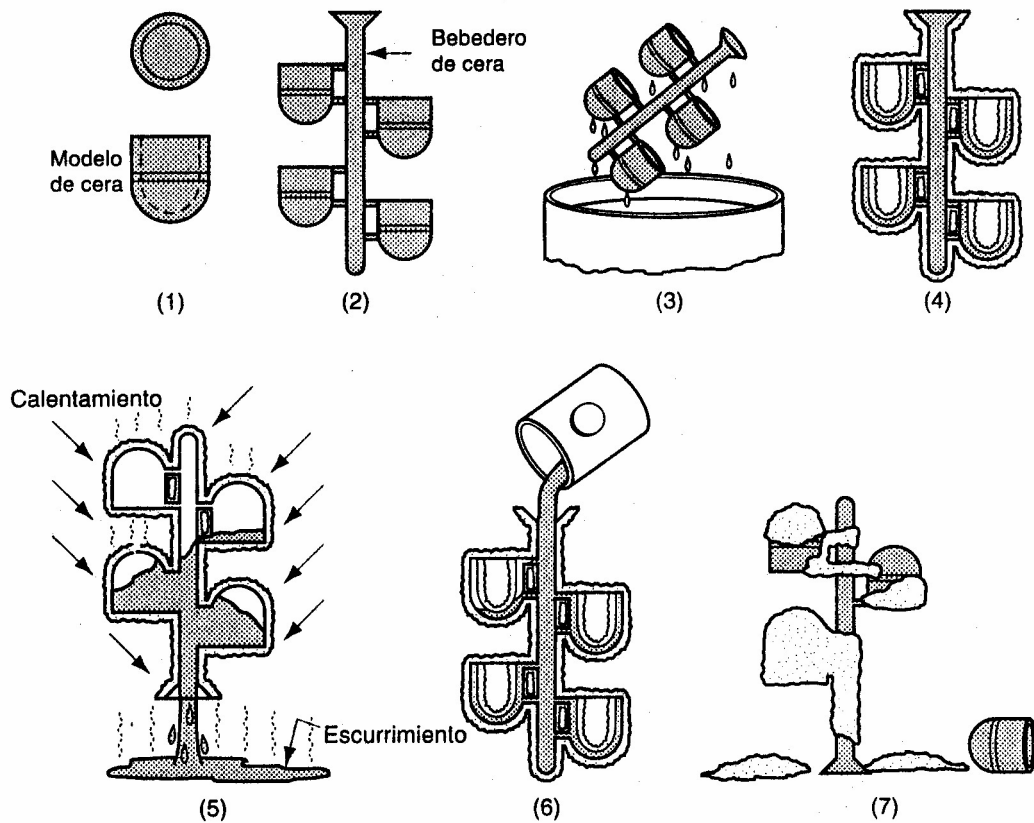


FIGURA 2.16 Pasos en la fundición por revestimiento. (1) se producen los patrones o modelos de cera; (2) se adhieren varios modelos a un bebedero para formar el modelo de árbol; (3) el modelo de árbol se recubre con una capa delgada de material refractario; (4) se forma el molde entero, cubriendo el árbol revestido con suficiente material para hacerlo rígido; (5) el molde se sostiene en posición invertida y se calienta para fundir la cera y dejar que escurra fuera de la cavidad; (6) el molde se precalienta a una alta temperatura para asegurar la eliminación de todos los contaminantes del molde, esto también facilita que el metal fluya dentro de la cavidad y sus detalles, el metal se vacía y solidifica; (7) el molde se rompe y se separa de la fundición terminada. Las partes se separan del bebedero de colada.

Las ventajas de la fundición por revestimiento son: 1) capacidad para fundir piezas complejas e intrincadas; 2) estrecho control dimensional con posibles tolerancias de ± 0.076 mm; 3) buen acabado de la superficie; 4) recuperación de la cera para reutilizarla y 5) por lo general no se requiere maquinado adicional. Éste es un proceso de forma neta, aunque relativamente costoso por la cantidad de pasos que involucra su operación. Las partes hechas por este método son normalmente de tamaño pequeño, aunque se han fundido satisfactoriamente partes de formas complejas de hasta 34 Kg. Pueden fundirse todos los tipos metales, incluyendo aceros, aceros inoxidable y otras aleaciones de alta temperatura. Algunos ejemplos de partes fundidas por este proceso son: partes complejas de maquinaria paletas y otros componentes para motores de turbina, así como joyería y accesorios dentales. En la figura 2,17 se

muestra una pieza que ilustra las características intrincadas que son posibles con la fundición por revestimiento.

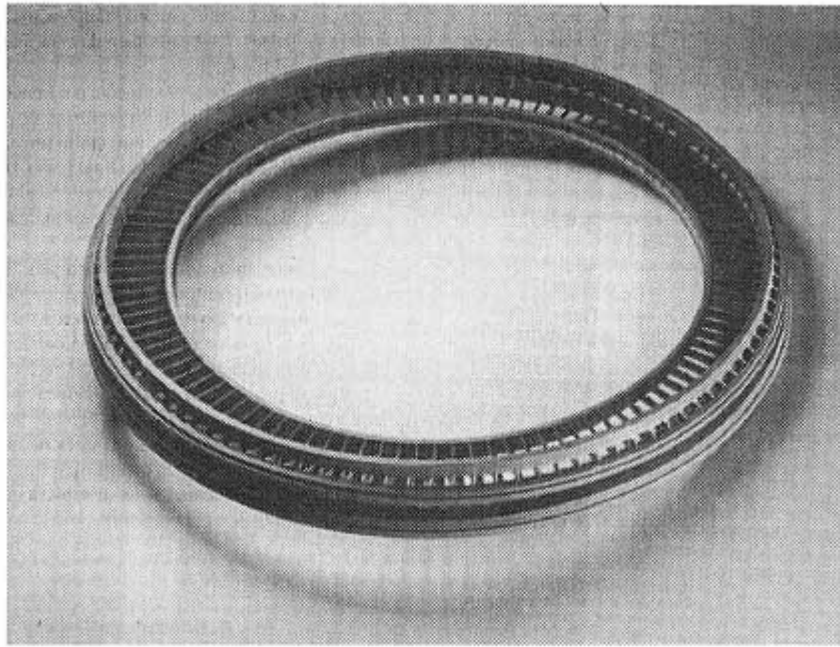


FIGURA 2.17 Estator de una sola pieza para compresor hecho mediante fundición por con 108 aletas aerodinámicas separadas (cortesía de Howmet Corp.).