

2.2.8 CALIDAD DE LA FUNDICIÓN

Hay numerosas contingencias que causan dificultades en una operación de fundición y originan defectos de calidad en el producto. En esta sección recopilamos una lista de defectos comunes que ocurren en la fundición e indicamos los procedimientos de inspección para detectarlos.

Defectos de la fundición Existen defectos comunes en todos los procesos de fundición. Estos defectos se ilustran en la figura 2.23 y se describen brevemente a continuación:

- a) **Llenado incompleto.** Este defecto aparece en una fundición que solidificó antes de completar el llenado de la cavidad del molde. Las causales típicas incluyen: 1) fluidez insuficiente del metal fundido, 2) muy baja temperatura de vaciado, 3) vaciado que se realiza muy lentamente y/o 4) sección transversal de la cavidad del molde muy delgada.
- b) **Junta fría.** Una junta fría aparece cuando dos porciones del metal fluyen al mismo tiempo, pero hay una falta de fusión entre ellas debido a solidificación o enfriamiento prematuro. Sus causas son similares a las del llenado incompleto.
- c) **Metal granoso o gránulos fríos.** Las salpicaduras durante el vaciado hacen que se formen glóbulos de metal que quedan atrapados en la fundición. Un buen diseño del sistema y de los procedimientos de vaciado que eviten las salpicaduras puede prevenir este defecto.
- d) **Cavidad por contracción.** Este defecto es una depresión de la superficie o un hueco interno en la fundición debido a la contracción por solidificación que restringe la cantidad de metal fundido disponible en la última región que solidifica. Ocurre frecuentemente cerca de la parte superior de la fundición, en cuyo caso se llama rechupe (figura 2.7). El problema se puede resolver frecuentemente por un diseño apropiado de la mazarota.
- e) **Microporosidad.** Se refiere a una red de pequeños huecos distribuida a través de la fundición debida a la contracción por solidificación del último metal fundido en la estructura dendrítica. El defecto se asocia generalmente con las aleaciones, debido a la forma prolongada, en que ocurre la solidificación en estos metales.
- f) **Desgarramiento caliente.** Este defecto, también llamado agrietamiento caliente, ocurre cuando un molde, que no cede durante las etapas finales de la solidificación o en las etapas primeras de enfriamiento, restringe la contracción de la fundición después de la solidificación. Este defecto se manifiesta como una separación del metal (de aquí el término desgarramiento o agrietamiento) en un punto donde existe una alta concentración de esfuerzos, causado por la indisponibilidad del metal para contraerse naturalmente. En la fundición en arena y otros procesos con molde desechable o consumible, esto se previene arreglando el molde para hacerlo retráctil. En los procesos de molde permanente se reduce el desgarramiento en caliente, al separar la fundición del molde inmediatamente después de la solidificación.

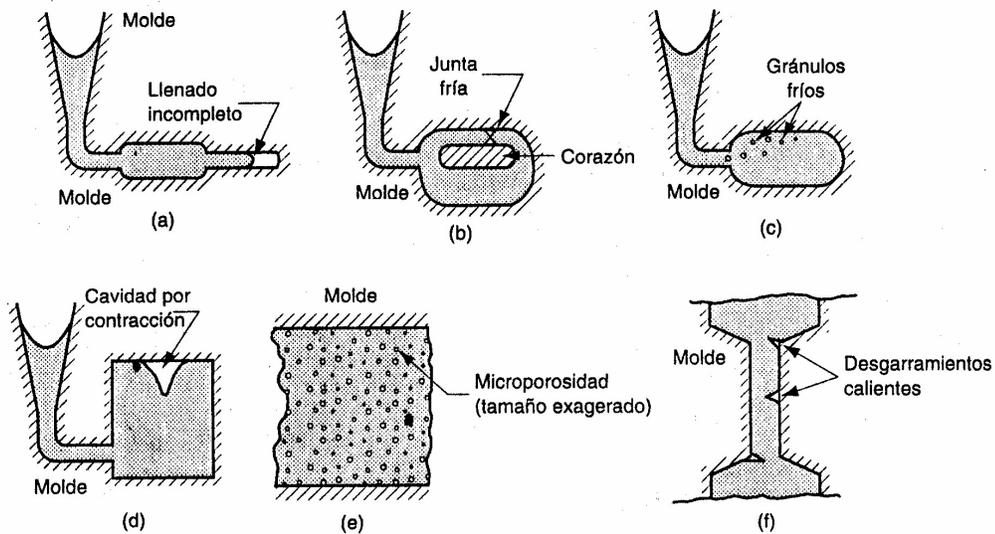


FIGURA 2.23 Algunos defectos comunes en las fundiciones: (a) llenado incompleto, (b) junta fría, (c) gránulos fríos. (d) cavidad por contracción, (e) microporosidad y (f) desgarramientos calientes.

Algunos defectos se relacionan con el uso de moldes de arena y, por tanto, ocurren solamente en la fundición en arena. Aunque en menor grado, los otros procesos de molde desechable son también susceptibles a estos problemas. En la figura 2.24 se muestran algunos de los principales defectos que ocurren en la fundición en arena

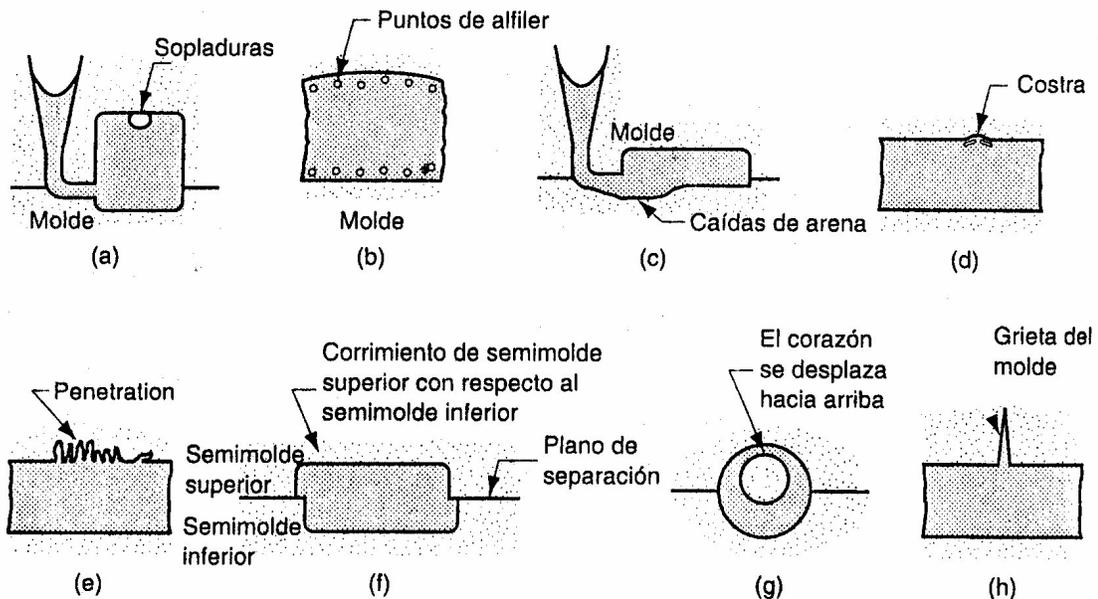


FIGURA 2.24 Defectos comunes de fundiciones en arena: (a) sopladuras (b) puntos de alfiler, (c) caídas de arena, (d) costras, (e) penetración, (f) corrimiento del molde (g) corrimiento del corazón y (h) molde agrietado.

- a) **Sopladuras.** Este defecto es una cavidad de gas en forma de pelota causada por un escape de gases del molde durante el vaciado. Ocurre en la superficie de la parte superior de la fundición o cerca ella. La baja permeabilidad, pobre ventilación y el alto contenido de humedad en la arena del molde son las causas generales.
- b) **Puntos de alfiler.** Es un defecto similar al de las sopladuras que involucra la formación de numerosas cavidades pequeñas de gas en la superficie de la fundición o ligeramente por debajo de ella.
- c) **Caídas de arena.** Este defecto provoca una irregularidad en la superficie de la fundición, que resulta de la erosión del molde de arena durante el vaciado. El contorno de la erosión se imprime en la superficie de la fundición final.
- d) **Costras.** Son áreas rugosas en la superficie de la fundición debido a la incrustación de arena y metal. Son causadas por desprendimientos de la superficie del molde que se descascaran durante la solidificación y quedan adheridas a la superficie de la fundición.
- e) **Penetración.** Cuando la fluidez del metal líquido es muy alta, éste puede penetrar en el molde o en el corazón de arena. Después de la solidificación, la superficie de la fundición presenta una mezcla de granos de arena y metal. Una mejor compactación del molde de arena ayuda a evitar esta condición.
- f) **Corrimiento del molde.** Se manifiesta como un escalón en el plano de separación del producto fundido, causado por el desplazamiento lateral del semimolde superior con respecto al inferior.
- g) **Corrimiento del corazón.** Un movimiento similar puede suceder con el corazón, pero el desplazamiento es generalmente vertical. El corrimiento del corazón y del molde es causado por la flotación del metal fundido.
- h) **Molde agrietado (venas y relieves).** Si la resistencia del molde es insuficiente, se puede desarrollar una grieta en la que el metal líquido puede entrar para formar una aleta en la fundición final.

Métodos de inspección Los procedimientos de inspección en la fundición incluyen: 1) inspección visual para detectar defectos obvios como llenado incompleto, cortes fríos y grietas severas en la superficie; 2) medida de las dimensiones para asegurarse que están dentro de las tolerancias; y 3) pruebas metalúrgicas, químicas, físicas y otras relacionadas con la calidad inherente del metal fundido. Las pruebas de la categoría 3 incluyen: a) pruebas de presión para localizar fugas en la fundición; b) métodos radiográficos, pruebas de partículas magnéticas, uso de líquidos penetrantes fluorescentes y

pruebas supersónicas para detectar defectos superficiales o internos en la fundición; c) ensayos mecánicos para determinar propiedades, tales como la resistencia a la tensión y dureza.

Si se descubren defectos, pero éstos no son serios, muchas veces es posible salvar la fundición por soldadura, esmerilado y otros métodos de recuperación que se hayan convenido con el cliente.

2.2.9 METALES PARA FUNDICIÓN

La mayoría de las fundiciones comerciales están hechas de aleaciones más que de metales puros. Las aleaciones son generalmente más fáciles de fundir y las propiedades del producto resultante son mejores. Las aleaciones de fundición pueden clasificarse en: ferrosas y no ferrosas. Las ferrosas se subdividen en hierros fundidos y aceros fundidos.

Aleaciones ferrosas: *hierro fundido* El hierro fundido es la más importante de todas las aleaciones de fundición. El tonelaje de fundiciones de hierro es varias veces mayor que el de todos los otros metales combinados. Existen varios tipos de fundición de hierro: 1) hierro gris, 2) hierro nodular, 3) hierro blanco (fundición blanca), 4) hierro maleable y 5) fundiciones de aleación de hierro. Las temperaturas típicas de vaciado para hierros fundidos están alrededor de los 1400 °C, dependiendo de la composición

Aleaciones ferrosas: *acero* Las propiedades mecánicas del acero lo hace un material atractivo para ingeniería, los procesos de fundición son también muy atractivos por su capacidad de generar formas complejas. Sin embargo, la fundición especializada del acero enfrenta grandes dificultades. Primero, el punto de fusión del acero es considerablemente más alto que el de los otros metales comunes de fundición. El intervalo de solidificación para los aceros de bajo carbón queda un poco abajo de los 1440 °C. Esto significa que la temperatura de vaciado requerida para el acero es bastante alta, alrededor de los 1650 °C. A elevadas temperaturas, la reactividad química del acero es alta. Se oxida fácilmente así que deben usarse procedimientos especiales durante la fusión y el vaciado para aislar al metal fundido del aire. Por otra parte, el acero fundido tiene una fluidez relativamente pobre, y esto limita el diseño de componentes de fundición de acero con secciones delgadas.

Varias características de las fundiciones de acero justifican los esfuerzos para resolver estos problemas. La resistencia a la tensión es bastante más alta en el acero que en la mayoría de los metales de fundición, ésta puede llegar hasta cerca de 410 MPa. Las fundiciones de acero tienen mejor tenacidad que la mayoría de las aleaciones de fundición. Las propiedades de las fundiciones de acero son isotrópicas; es decir, su resistencia es prácticamente la misma en cualquier dirección. En cambio, las partes formadas mecánicamente (por ejemplo, por laminado o forjado) exhiben direccionalidad en sus propiedades. El comportamiento isotrópico del material puede ser conveniente, dependiendo de los requerimientos del producto. Otra ventaja de las fundiciones de acero es que pueden soldarse fácilmente con otros componentes de acero para fabricar estructuras o para reparar las fundiciones, sin que exista una pérdida significativa de su resistencia.

Aleaciones no ferrosas Los metales para fundición no ferrosos incluyen aleaciones de aluminio, magnesio, cobre, estaño, zinc, níquel y titanio. Las *aleaciones de aluminio* son en general las más manejables. El punto de fusión del aluminio puro es 600 °C por consiguiente, las temperaturas de vaciado para las aleaciones de aluminio son bajas comparadas con las de las fundiciones de hierro y acero. Las propiedades que hacen atractivas a estas aleaciones para la fundición son: su peso ligero, su amplio rango de propiedades de resistencia que se pueden obtener a través de tratamientos térmicos y su facilidad de maquinado. Las *aleaciones de magnesio* son las más ligeras de todos los metales de fundición. Otras propiedades incluyen resistencia a la corrosión y altas relaciones de resistencia y tenacidad al peso.

Las *aleaciones de cobre* incluyen al bronce, latón y bronce al aluminio. Las propiedades que hacen atractivas a estas aleaciones son su resistencia a la corrosión, su apariencia atractiva y sus buenas cualidades antifricción. El alto costo del cobre es una limitación en el uso de sus aleaciones. Sus aplicaciones comprenden accesorios para tubería, aletas de propulsores marinos, componentes de bombas y joyería ornamental.

El estaño tiene el punto de fusión más bajo de los metales de fundición. Las *aleaciones a base de estaño* son generalmente fáciles de fundir. Tienen buena resistencia a la corrosión, pero pobre resistencia mecánica, lo cual limita sus aplicaciones a ollas de peltre y productos similares que no requieren alta resistencia. Las aleaciones de zinc se usan comúnmente para fundición en dados. El zinc tiene un punto de fusión bajo y buena fluidez, propiedades, que lo hacen altamente fundible. Su mayor debilidad es su baja resistencia a la termofluencia, por tanto, sus fundiciones no pueden sujetarse prolongadamente a altos esfuerzos.

Las *aleaciones de níquel* tienen buena resistencia en caliente y resistencia a la corrosión, propiedades que son adecuadas para aplicaciones a altas temperaturas, como motores de propulsión a chorro, componentes de cohetes, escudos contra el calor y partes similares. Las aleaciones de níquel también tienen un punto de fusión alto y no son fáciles de fundir. Las *aleaciones de titanio*, son aleaciones resistentes a la corrosión con una alta relación de resistencia-peso, Sin embargo, el titanio tiene un alto punto de fusión, baja fluidez y es muy propenso a oxidarse a elevadas temperaturas. Estas propiedades hacen que el titanio y sus aleaciones sean difíciles de fundir.

2.2.10 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE PRODUCTOS

Si el diseñador de productos selecciona la fundición como el proceso principal de manufactura para un componente particular, serán necesarios ciertos lineamientos que faciliten la producción y eviten muchos de los defectos que se enumeran en la sección 2.2.8. A continuación se presentan algunos lineamientos y consideraciones importantes para el diseño de fundiciones.

Simplicidad geométrica. Aunque la fundición es un proceso que puede usarse para producir, formas complejas la simplificación del diseño propiciará una fundición fácil y eficiente. Al evitar

complejidades innecesarias se simplifica la hechura del molde, se reduce la necesidad de utilizar corazones y se mejora la resistencia de la fundición.

Esquinas. Deben evitarse esquinas y ángulos agudos, ya que son fuente de concentración de esfuerzos y pueden causar desgarramientos calientes y grietas en la fundición. Es necesario redondear los ángulos en las esquinas interiores y suavizar los bordes agudos.

Espesores de sección. Los espesores de sección deben ser uniformes a fin de prevenir bolsas de contracción. Las secciones más gruesas crean *puntos calientes* en la fundición, debido a un mayor volumen que requiere más tiempo para solidificar y enfriar. Éstos son lugares posibles donde se pueden formar bolsas de contracción. La figura 2.25 ilustra el problema y ofrece algunas soluciones posibles.

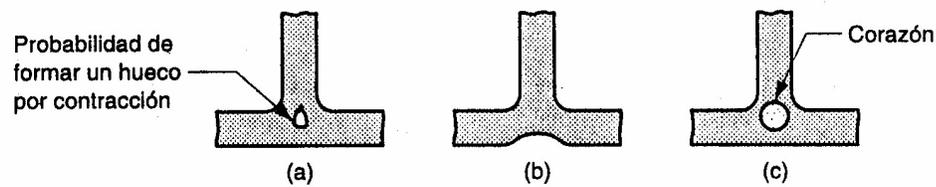


FIGURA 2.25 (a) En la parte gruesa de la intersección se puede formar una cavidad por contracción, (b) esto se puede remediar rediseñando la pieza para reducir el espesor y (c) usando un corazón.

Ahusamiento. Las secciones de la pieza que se proyectan dentro del molde deben tener un ahusamiento o ángulos de salida, como se define en la figura 2.26. El propósito de este ahusamiento en los moldes consumibles o desechables es facilitar la remoción del modelo del molde. En la fundición con molde permanente el objetivo es ayudar a remover la parte del molde. Si se usan corazones sólidos, éstos deben dotarse con ahusamientos similares en los procesos de fundición. El ahusamiento requerido necesita ser solamente de 1º para fundición en arena y de 2º a 3º para procesos con molde permanente.

Uso de corazones. Puede reducirse la necesidad de usar corazones con cambios menores en el diseño de la pieza, como se muestra en la figura 2.25.

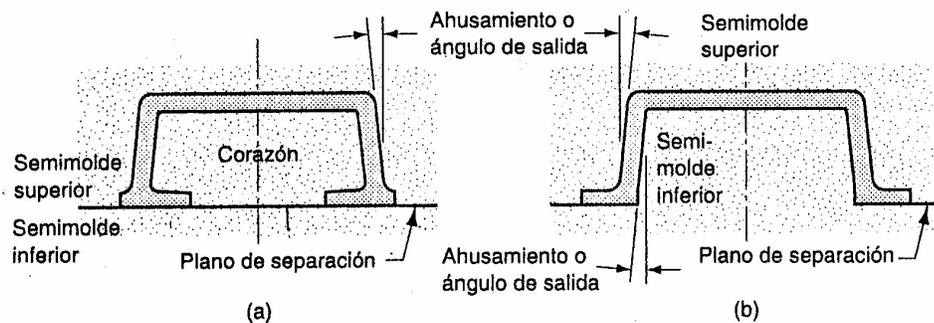


FIGURA 2.26 Cambio de diseño para eliminar la necesidad de usar un corazón: (a) diseño original y (b) rediseño.

Tolerancias dimensionales y acabado superficial. Se pueden lograr diferencias significativas en la precisión dimensional y en los acabados de la fundición, dependiendo del proceso que se use. La tabla 2.2 muestra una recopilación de valores típicos para estos parámetros.

Tolerancias de maquinado. Las tolerancias que se especifican en muchos procesos de fundición son insuficientes para cumplir las necesidades funcionales de muchas aplicaciones. La fundición en arena es el ejemplo más característico de esta necesidad. En este caso, deben maquinarse porciones de la fundición a las dimensiones requeridas. Casi todas las fundiciones en arena deben maquinarse total o parcialmente a fin de darles funcionalidad. Por consiguiente, debe dejarse en la fundición material adicional, llamado tolerancia de maquinado para facilitar dicha operación. Las tolerancias típicas de maquinado para fundiciones de arena fluctúan entre 2 y 6 mm.

TABLA 2.2 Tolerancias dimensionales típicas y acabados superficiales para diferentes procesos de fundición y metales

Proceso de fundición	Tamaño de la parte	Tolerancia		Rugosidad superficial	
		Pulg	mm	μpulg	μm
Fundición en arena ^a				250-1000	(6-25)
Aluminio ^b	Pequeño	±0.020	(±0.5)		
Hierro fundido	Pequeño	±0.040	(±1.0)		
	Grande	±0.016	(±1.5)		
Aleaciones de cobre	Pequeño	±0.015	(±0.4)		
Acero	Pequeño	±0.050	(±1.3)		
	Grande	±0.080	(±2.0)		
Molde de yeso	Pequeño	±0.005	(±0.12)	30	(0.75)
	Grande	±0.015	(±0.4)		
Molde permanente				125	(3.2)
Aluminio ^b	Pequeño	±0.010	(±0.25)		
Hierro fundido	Pequeño	±0.030	(±0.8)		
Aleaciones de cobre	Pequeño	±0.015	(±0.4)		
Acero	Pequeño	±0.020	(±0.5)		
Fundición en dados				40-100	(1-25)
Aleaciones de cobre	Pequeño	±0.005	(±0.12)		
Aluminio ^b	Pequeño	±0.005	(±0.12)		
Revestimiento				30-100	(0.75-2.5)
Aluminio ^b	Pequeño	±0.005	(±0.12)		
Hierro fundido	Pequeño	±0.010	(±0.25)		
Aleaciones de cobre	Pequeño	±0.005	(±0.12)		
Acero	Pequeño	±0.010	(±0.25)		

^a Los valores de rugosidad son para moldes de arena verde; para otros procesos con molde de arena, el acabado superficial es mejor

^b Los valores para el aluminio se aplican también al magnesio