

# **FABRICACIÓN DE FUNDICIÓN NODULAR**

***José Luis Enríquez Berciano***

***Dr. en Ciencias Químicas***

***Enrique Tremps Guerra***

***Dr. Ingeniero de Minas***

**Universidad Politécnica de Madrid**

***Diciembre 2012***

El presente trabajo fue publicado en 13 partes en la revista Fundidores entre diciembre de 2003 y marzo de 2005.

Reunimos ahora en un solo documento todos estos artículos para su publicación en el repositorio de la UPM.

Para contactar con los autores:

José Luis Enríquez: [joseluis.enriquez@upm.es](mailto:joseluis.enriquez@upm.es)

Enrique Tremps: [enrique.tremps@upm.es](mailto:enrique.tremps@upm.es)

# F

## PRÁCTICA DE FUNDICIÓN: FABRICACIÓN DE FUNDICIÓN NODULAR (Parte I)

*José Luis Enríquez  
Enrique Tremps*

### INTRODUCCION

#### GENERALIDADES

En esta revisión se describe resumidamente la tecnología de fabricación de las fundiciones con grafito esferoidal, también llamadas "Fundiciones Nodulares" o "Hierro Dúctil". La característica básica de este material es que su grafito se presenta en forma de esferoides. No hay que confundirlas con las fundiciones maleables, cuyo grafito esferoidal se obtiene por tratamiento térmico de recocido y no por adiciones esferoidizantes en cuchara.

Cuando el grafito se agrupa en forma de nódulos o esferoides, no rompe la continuidad de la matriz ni provoca efecto de entalla, lo que hace aumentar sensiblemente las características mecánicas en comparación con las que presentaría una fundición corriente con grafito laminar. Así, la resistencia a la tracción supera los 40 kg/mm<sup>2</sup>, pudiendo alcanzar 120 kg/mm<sup>2</sup>. En cuanto al alargamiento, puede llegar al 30% en las ferríticas. Finalmente, la dureza Brinell obtenible está entre 140 y 500 unidades. Todo ello sin perder las propiedades características de la fundición gris laminar.

#### FORMACIÓN Y CRECIMIENTO DEL GRAFITO

Parece que el grafito se forma por cristalización directa a partir del "liquidus", aunque también puede proceder de la descomposición de la cementita o de la austenita saturada en carbono. En cuanto a la forma del grafito, es función de la presencia o ausencia de algunos elementos superficialmente activos (azufre, por ejemplo), así como de la presencia de gérmenes de estructura metalográfica particular.

Estos gérmenes parecen estar constituidos por los sulfuros y óxidos de elementos de inoculación, cuyo punto de

fusión es elevado, como MgS, CeS, MgO, CaO, CeO<sub>3</sub>, etc. Algunos intermetálicos de silicio como SiMg o Si<sub>2</sub>Ce, de estructura metalográfica cercana al grafito, pueden originar esferoides mediante un recocido de la fundición una vez solidificada. Los nodulizantes, cuyos elementos (alcalinos, alcalinotérreos, tierras raras) son muy reactivos frente a oxígeno y azufre, cumplen las dos condiciones expuestas anteriormente y determinan la obtención de grafito esferoidal. De todos ellos, el más usual es el magnesio, bien puro o bien aleado.

#### PROPIEDADES Y EMPLEO DE ESTAS FUNDICIONES

Además de resistencia elevada se alcanza también buena ductilidad y resiliencia. La finura de constituyentes de la matriz les confiere mayor dureza que las fundiciones laminares, si bien el nodular es más fácil de mecanizar que éstas. También se consigue excelente estanqueidad, grado de pulido y resistencia a la corrosión. Resisten al calor y choque térmico, y presentan un buen coeficiente de frotamiento y resistencia al desgaste, tanto en seco como con lubricación.

Estas propiedades generan algunas aplicaciones como:

Resistencia elevada, alargamiento bajo, buenas características de frotamiento: Cilindros de laminación, cigüeñales, engranajes, árboles de levas, discos de embrague, bancadas de máquinas herramienta, platos de torno, roldanas, soportes de juntas de cierre, piezas de maquinaria agrícola.

Estanqueidad: Tuberías de fundición, cilindros de aceite de servomotores, cuerpos de amortiguadores hidráulicos.

Resistencia al calor y a ciclos de calentamiento-enfriamiento: Cilindros de laminación, coquillas de centrifuga-

doras de cilindros, moldes metálicos para no ferrosos, enfriadores, moldes para fabricación de neumáticos, colectores de escape.

Facilidad de mecanizado y resistencia al desgaste: Piezas de maquinaria agrícola, engranajes de cremalleras, roldanas, camisas, cilindros, segmentos.

## MOLDEO

### GENERALIDADES

La fundición nodular puede considerarse como “un acero que se obtiene con la misma facilidad que la fundición gris”. Desde el punto de vista de fluidez y facilidad de llenado de molde supera, incluso, al hierro gris laminar, y los sistemas de llenado son extrapolables. Sin embargo, en lo que concierne a fenómenos de contracción, el nodular se comporta de forma más parecida a un acero, lo que hay que tener presente al calcular y diseñar los sistemas de alimentación.

Desde el punto de vista de material y método de moldeo, para obtener buenas piezas de nodular hay que elaborar adecuadamente los moldes vigilando el tipo de arena, grado de atacado, calidad de las cajas de moldeo, etc.

### MOLDES DE ARENA AGLUTINADA

La fundición nodular tiene una piel plástica tenaz, de manera que hay siempre alguna porción de líquido presente durante todo el intervalo de solidificación de la pieza colada, lo que hace que ésta puede deformarse y adaptarse a cualquier movimiento de las paredes del molde. Esta circunstancia obliga a que los moldes presenten una dureza superior a 90 unidades. Esto lleva, a su vez, a reducir en lo posible la cantidad de finos, de forma que se tenga permeabilidad suficiente.

Es conveniente aumentar la resistencia en caliente de la arena para que aguante un prolongado estado fluido del metal, así como mantener por debajo del 2% la deformación en verde y en seco. Medida adicional es trabajar con buenas cajas, y graparse y cargarse con pesas los moldes para reducir aún más el posible movimiento de paredes del molde. Finalmente, en estos moldes de arena verde hay que mantener constante la cantidad de humedad para reducir al mínimo la aparición de arrastres, inclusiones o pinholes.

### MOLDES DE ARENA AGLOMERADA

La deformación de la cavidad de molde juega un papel muy importante en el grado de contracción. En moldes rígidos de arena aglomerada o “moldeo químico” (cáscara, caja fría o caja caliente) se elimina esta variable. Por otra parte se reducen o eliminan los arrastres, darts o roturas de molde, a la vez que se alcanza buen acabado superficial y tolerancias dimensionales estrechas. Hay que tener precaución debido al desprendimiento de gases origi-

nado por las resinas. También pueden producirse piezas de precisión en fundición con grafito esferoidal colada en moldes cerámicos a la cera perdida, así como en moldes permanentes o semipermanentes.

## SISTEMAS DE COLADA Y ALIMENTACIÓN

### SISTEMAS DE COLADA

Un sistema de llenado de la cavidad de molde ha de cumplir las siguientes condiciones básicas:

- Atrapar la escoria y suciedad transportada por el caldo, antes que éste llegue a la cavidad del molde.
- Introducir el metal en la cavidad de molde con la menor turbulencia posible.
- Regular eficientemente la velocidad de la corriente de metal en los canales.
- Establecer gradientes favorables de temperatura en la pieza a fin de obtener solidificación dirigida.

### Bacinos de colada

En el caso de piezas de tamaño medio o grande es muy favorable la implantación de un bacino o artesa de colada diseñado adecuadamente. En máquinas de moldeo por compresión se dispone un modelo de bacino, con buena salida, en la cabeza de prensado. Durante la colada, el cucharero ha de mantener en todo momento lleno de caldo el bacino para asegurar eficiencia del resto del sistema de colada. La FIGURA 1 aporta ideas sobre el diseño de estos bacinos.

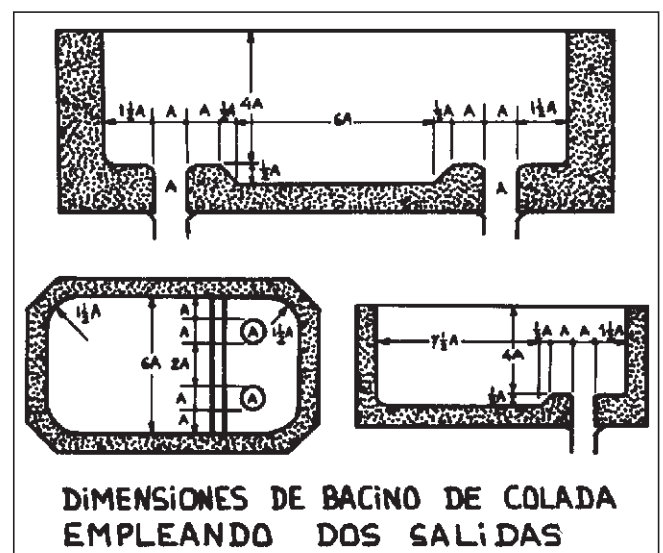


Figura 1.

### Dimensionado del sistema

Para fundición nodular es favorable trabajar con un sistema de colada de presión positiva, es decir, presurizado. La experiencia muestra como más favorable una relación de secciones bebedero / canal / ataques igual a

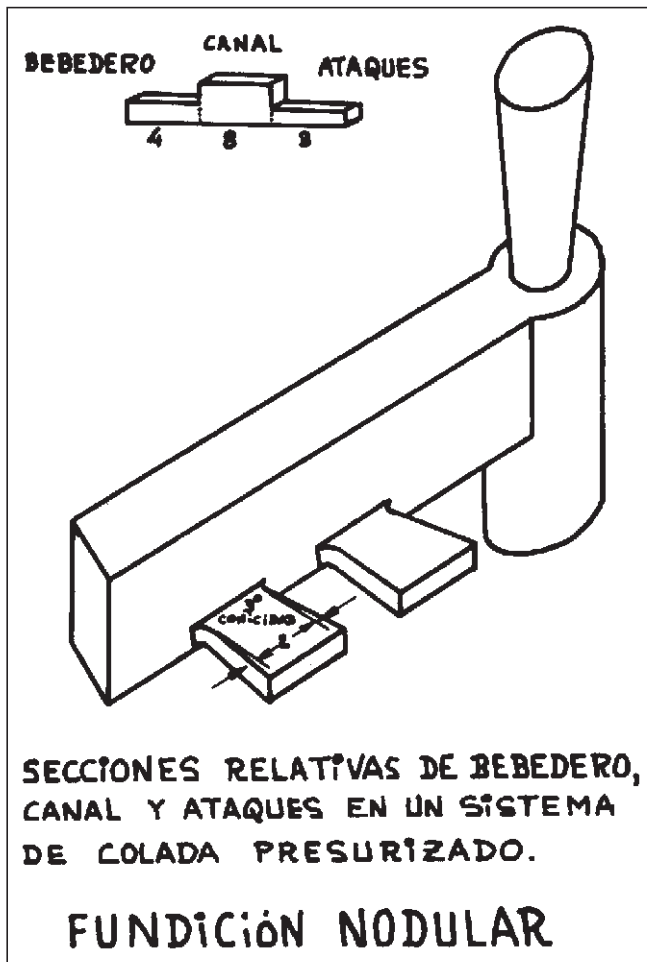


Figura 2.

4 / 8 / 3, (FIGURA 2). Con esta disposición se reduce la velocidad del metal en el canal, de manera que las inclusiones o escoria transportadas floten y queden atrapadas en el canal, especialmente si la sección de éste tiene altura doble que la anchura.

Es muy importante minimizar la aspiración, lo que se consigue con algunas medidas prácticas como dar conicidad inversa a la bajada o caña del bebedero, implantar un choque o pocillo en su base y unión al canal, evitar ángulos rectos en los empalmes choque - canal y canal - ataques, curvar los canales, etc. Hay que tener presente que todo aquello que evite turbulencia de flujo minimizará la aspiración y los arrastres. La FIGURA 3 expresa gráficamente estos consejos prácticos.

### Secciones de ataques

Hay que determinar la velocidad con la que debe colarse el molde, en función del peso de caldo y tiempo de colada; una vez deducida esta velocidad se puede calcular el número de ataques y las secciones de los mismos. En el ábaco de la FIGURA 4 se tienen dos curvas; la superior determina la sección del choque (y de los ataques, por ende) en función del peso de caldo a colar, mientras que la inferior ilustra la relación entre tiempo de colada y este peso de caldo. Estas curvas se refieren

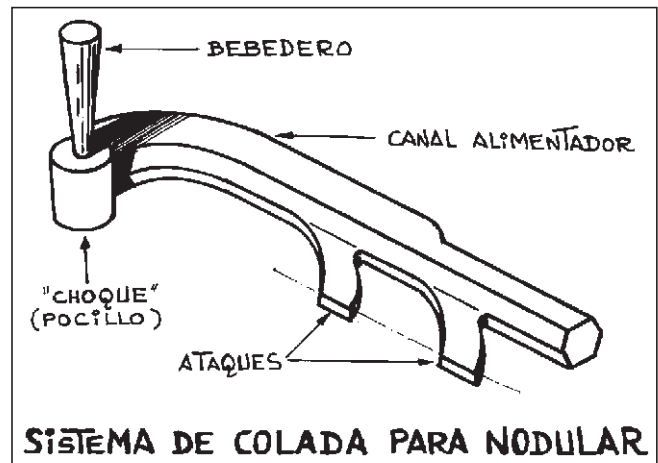


Figura 3.

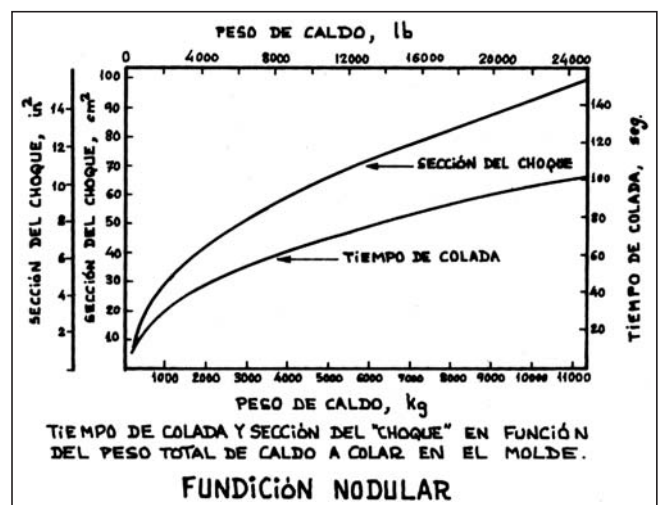


Figura 4.

a caudales que no erosionan arenas de resistencia normal.

Ha de tenerse en cuenta que la cantidad de escoria y arrastre originados es directamente proporcional al tiempo requerido para colar el molde, lo cual es crítico en piezas muy grandes. Por ejemplo, una pieza de 10.000 kg en fundición nodular no debe colarse en más de 2 minutos.

En algunos casos hay que adoptar velocidades muy rápidas de colada. Por ejemplo, se conoce el peso de caldo del molde (2.700 kg) y el tiempo deseado de colada (30 seg). Supuesta una velocidad unitaria de 1,1 kg de caldo por cm<sup>2</sup> de sección y por segundo, el cálculo sería:

$$\text{Velocidad requerida} = 2.700 / 30 = 90 \text{ kg/seg}$$

$$\text{Superficie de choque requerida} = 90 / 1,1 = 80 \text{ cm}^2$$

### Tipos de sistemas de colada

Además de las dimensiones, también la disposición de los elementos del sistema de colada puede ser crítica. En la FIGURA 5 se esquematizan los tipos básicos de sistema de colada por arriba, por abajo e intermedia.

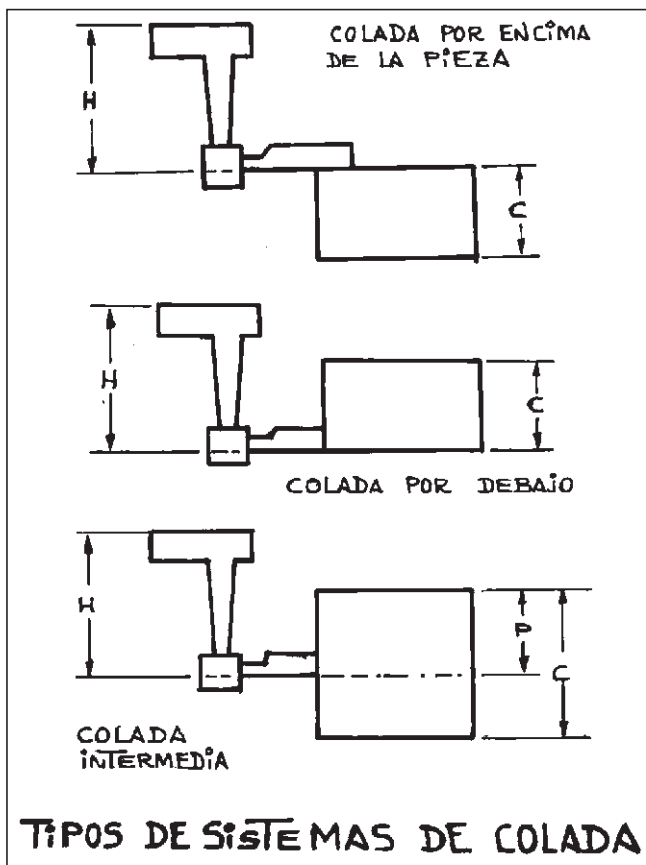


Figura 5.

### Colada por arriba

Considerada desde el punto de vista de alimentación es óptima, ya que el caldo más caliente está arriba y situado, además, en la zona más caliente del molde. Esto garantiza un gradiente térmico favorable y una solidificación bien dirigida. Sin embargo, la caída violenta del caldo ocasiona turbulencia que, a su vez, va a dar lugar a problemas de aspiración de gases y arrastre de tierra del molde.

Una variante de este método es lo que se llama colada en lluvia o en cortina, representada en la FIGURA 6. Las inclusiones generadas flotan hacia la mazarota que para ello está situada inmediatamente debajo de la entrada en lluvia, con las entradas separadas entre sí una distancia mayor que el triple del espesor de la pieza a colar. Ha de tenerse en cuenta también que cualesquiera irregularidades o protuberancias (bridas, etc.) frenarían la evacuación de las inclusiones, por lo que este sistema está adaptado a piezas lisas como, por ejemplo, camisas o cilindros de diversos tamaños.

### Colada por abajo

Es recomendable para piezas de nodular, ya que reduce la turbulencia y la aspiración en el molde. Un sistema fácil de moldeo se ve en la FIGURA 7 en la que, como puede verse, toda la pieza se encuentra situada en el semimolde superior o parte alta. Para este tipo de piezas el sistema de colada se monta fácilmente en la placa - modelo.

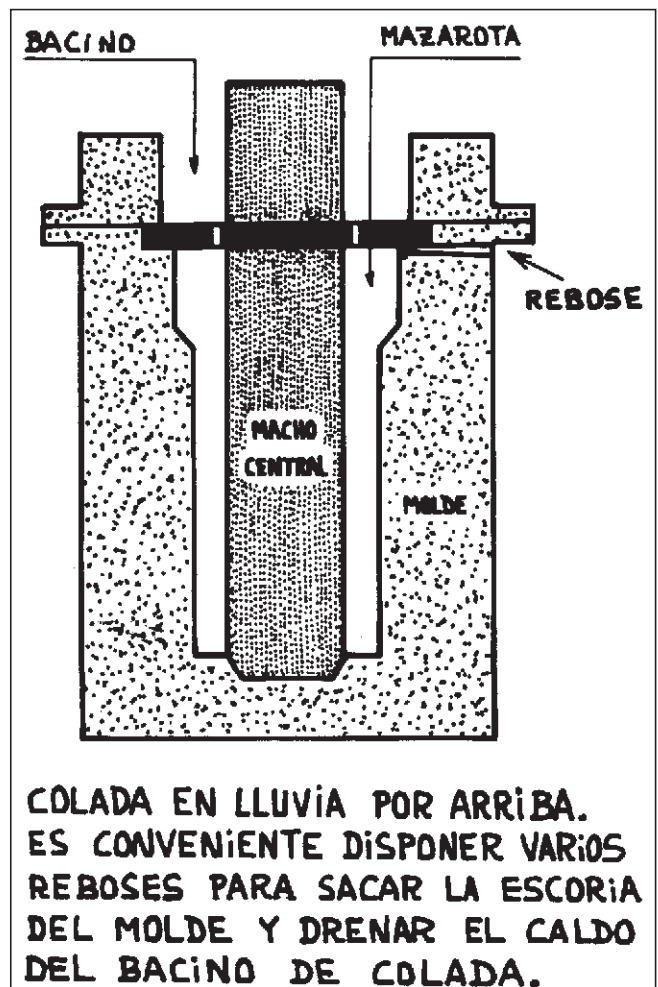


Figura 6.



Figura 7.



La desventaja de este método es la de presentar un gradiente térmico desfavorable, ya que la zona más caliente del molde es ahora la parte inferior, con lo que no se pueden aprovechar los recursos de la solidificación dirigida. Esta circunstancia obliga a disponer mazas y enfriadores para evitar defectos de contracción (FIGURA 8). En esta figura se implanta un macho para conformar un sistema de entrada por la base de la cavidad del molde.

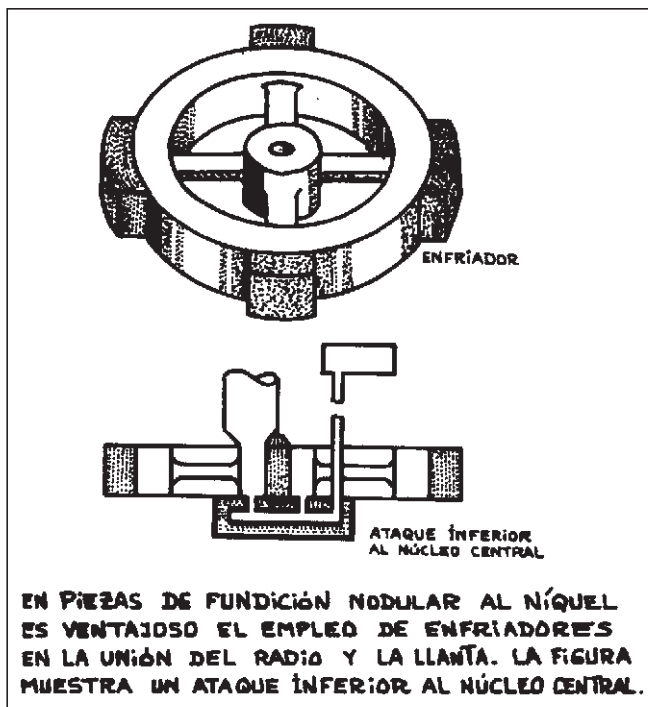


Figura 8.

Este es un buen método para producir ruedas o volantes en moldes de arena aglomerada, implantando enfriadores frente a las uniones de radios y llanta, los cuales (enfriadores) han de tener suficiente volumen para crear nueva dirección de solidificación y solventar los problemas de contracción en dichas uniones.

### Colada intermedia o escalonada

En moldes que tienen cavidades profundas y deben colarse por abajo para evitar turbulencia y aspiración, la colada escalonada mejora la distribución de temperaturas y el gradiente térmico. En la FIGURA 9 se aporta un diseño que funciona bastante bien. Se regula la altura efectiva de la bajada, ya que cuando el nivel del caldo en la cavidad llega hasta un ataque superior, el caldo comienza a entrar por éste y no por el inmediatamente inferior. Es normal fabricar el sistema de colada como macho aparte y postizo, encolando posteriormente las piezas e insertándolo en el molde.

### Recapitulación sobre sistemas de colada

Al diseñar el sistema de llenado de una pieza hay que hacer unas consideraciones previas:

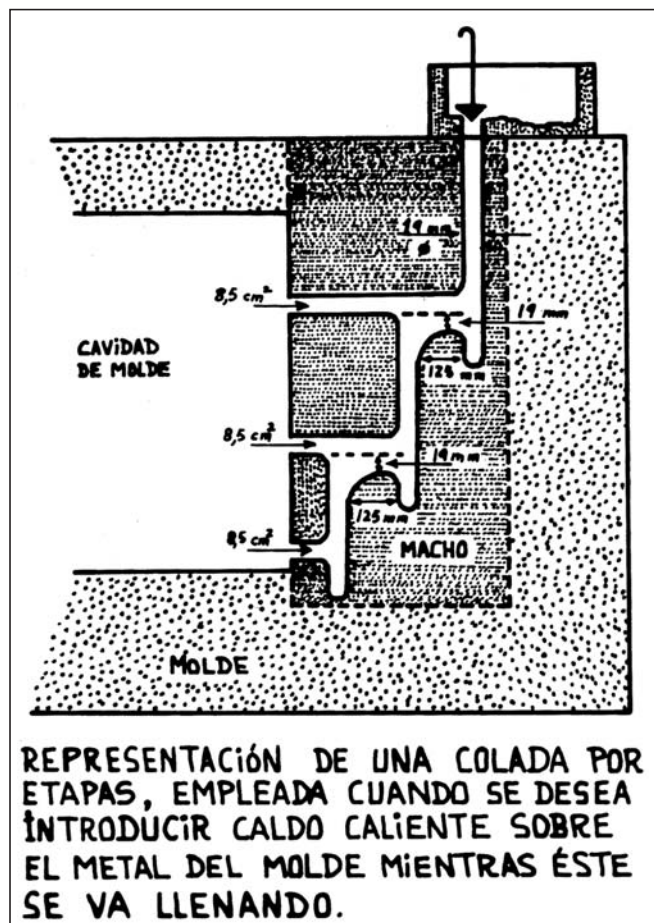


Figura 9.

1. Estudiar el modelo para determinar las posibles rutas de la corriente de metal.
2. Emplear un sistema de colada que origine la menor cantidad de turbulencia y atrape la escoria y tierra antes que éstas penetren en la cavidad del molde.
3. Diseñar el sistema de colada de forma que se mantenga mínima la turbulencia del flujo de metal dentro de la cavidad de molde, rediseñando las particiones del modelo si fuera necesario.
4. Colar la pieza con la mayor velocidad posible para reducir el tiempo de oxidación en el molde.
5. Emplear suficiente número de ataques para obtener buena distribución del metal y reducir la velocidad lineal de la corriente líquida.
6. Siempre que sea posible, evitar moldear a mano el sistema de colada y montarlo sobre placa-modelo.
7. Dada la gran velocidad de colada es fundamental asegurar un buen venteado de los moldes para asegurar la evacuación de los gases durante la colada.

### SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN

#### Mecanismo de la solidificación

La fundición nodular no solidifica como otros metales ferrosos que lo hacen progresivamente desde la piel hacia el interior. Durante casi todo el proceso de solidificación

del nodular hay metal líquido en la superficie. La fundición gris y el acero congelan progresivamente hacia el interior con un gradiente considerable. La fundición nodular, incluso con 3,6% de carbono equivalente, retiene aún algo de líquido en la superficie, mientras que más del 80% del metal está sólido al cabo de unos 10 minutos. La fundición nodular tiende a la solidificación instantánea y se da una fuerte contracción si no se confina estrechamente.

La contracción volumétrica total de la fundición nodular es la resultante de cuatro factores:

- Contracción líquida.
- Contracción de solidificación.
- Deformación de la cavidad del molde.
- Precipitación del grafito.

En estas fundiciones, casi siempre hipereutécticas, parte importante del carbono precipita como grafito (menor densidad, mayor volumen) con lo que se compensa la contracción líquida resultante del enfriamiento. La deformación de la cavidad del molde juega un papel muy importante en la contracción; en moldes de arena aglutinada y en verde el movimiento de paredes del molde es del 0,4%, lo que equivale a un cambio de volumen del 2,0% para secciones pequeñas o medias (menores de 25 mm), lo que obliga a atacar más duro el molde y emplear cajas de mayor rigidez.

La suma de contracción líquida, contracción de solidificación y deformación de molde verde es 12,13%. Si a esta cifra se resta la expansión gráfica, que es un 10,60%, resulta un valor final de 1,53%. Ésta sería la cantidad teórica de metal necesaria para mazarotaje o alimentación.

### Contracción esponjosa

Al final de la solidificación se produce la contracción esponjosa interdendrítica, minimizable si se provoca un grafito adecuado. Esto es crítico en piezas que tienen zonas difíciles de alimentar adecuadamente. En la FIGURA 10 se ve gráficamente la importancia que tiene el balance correcto de carbono y silicio en el desarrollo de estos problemas. La fórmula:

$$C_{TOTAL} + Si / 7 = 3,9$$

cuantifica este balance. Su representación gráfica se desvía de la línea correspondiente a la fórmula del carbono equivalente para valores superiores de silicio. Esto se debe a que en este aspecto la efectividad del silicio es de sólo 1/7, mientras que para efectos de carbono equivalente su influencia es de 1/3.

Esto es muy importante en moldes duros (arena verde atacada duro o arena aglomerada con resinas). Si se tiene 3,50% de carbono el silicio debe ser como mínimo 2,60%; para 3,60 se irá a mayor de 2,30 y para 3,70 de carbono hay que pensar

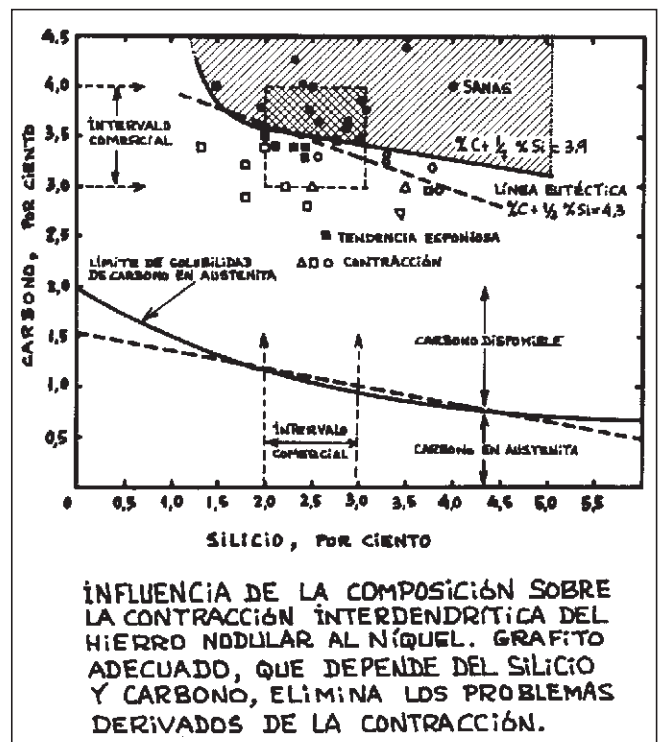


Figura 10.

ya en más de 1,80% de silicio. Por ejemplo, sería esperable contracción en el caso de 3,50 de carbono y 2,20 de silicio. Todo esto lleva a concluir que hay que mantener estricto control de la composición si se desea garantizar fiabilidad de resultados en lo que concierne a aprovechamiento de las propiedades de autoalimentación de la fundición con grafito esferoidal. La FIGURA 11 aporta información gráfica sobre la influencia de la composición química (en concreto los contenidos de carbono y silicio) sobre algunas características de solidificación de la fundición nodular.

### Colada sin alimentación

La utilización de moldes duros, en conjunción con las características de autoalimentación del nodular, permite colar piezas sin mazarota. Controlando la composición y la temperatura de colada puede conseguirse que la ex-

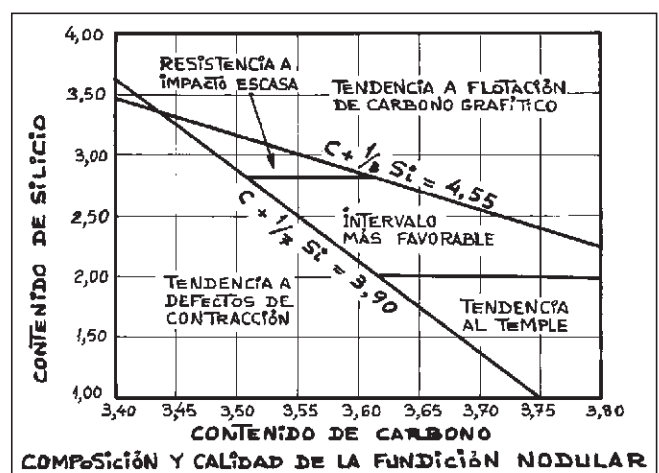


Figura 11.



pansión promovida por el grafito compense el rechupe derivado de las contracciones líquida y de solidificación. Este artificio puede ser válido en piezas relativamente uniformes, de secciones medias o gruesas, en las que no se produce subenfriamiento.

En secciones heterogéneas, la más delgada solidifica antes que la gruesa y puede originar rechupe. Esto se minimiza si se mantiene la constante 3,9 citada anteriormente. También es buena medida uniformizar las velocidades de enfriamiento disponiendo enfriadores frente a zonas gruesas y/o aislantes en zonas delgadas.

En el caso de moldes de arena aglutinada (arena verde o a la bentonita) insuficientemente atacados es necesario alimentar las piezas para evitar defectos de contracción. Por otra parte, piezas intrincadas y con espesores variados, incluso en molde atacado duro, requieren prever mazarotas en algunas zonas a fin de asegurar sanidad. Esta circunstancia se aprecia en los hundimientos superficiales que se observan en zonas masivas, aletas, cambios de sección o zonas ca-lientes originadas por entradas impropia-mente distribuidas.

### Diseños de mazarotas

La mazarota ha de alimentar metal hasta el último momento de la solidificación, para lo cual ha de ser geométricamente correcta y suficientemente grande. La FIGURA 12 muestra esquemas de mazarotas que son satisfactorias en condiciones normales, aplicando las correcciones que haya menester para adaptarse a la cuantía de contracción o velocidad de solidificación de cada pieza concreta.

El rendimiento normal de una mazarota fría es de un 20%. Si se intercala en el sistema de llenado de la pieza, el flujo de metal caliente permite llegar hasta un 30%. Si se hace uso de manguitos exotérmicos aumenta todavía más la eficiencia de la mazarota y el porcentaje de pieza útil frente al total de caldo colado. Este ahorro resulta especialmente útil en el caso de piezas gruesas o series largas. También se sabe que en placas de 6 a 60 mm de espesor moldeadas en verde, la distancia de alimentación es 4,5 veces el espesor de la sección a la que está unida; no obstante, en muchos casos (volantes, etc.) puede no ser suficiente y obligar a colocar más de una mazarota y/o recurrir a enfriadores.

Una mazarota superior, tal como se vió en la FIGURA 12 (a), se coloca sobre la parte más alta de la pieza y, generalmente, se alarga hasta asomar sobre el semimolde superior. Este sistema se adapta más a molde manual, en que las mazarotas no están sobre placa, que a molde mecánico. Las dimensiones del cuello o unión son muy importantes para impedir el rechupe esponjoso debajo de la mazarota. Como ésta se llena con el primer metal que entró al molde, es decir, el más frío, hay que recurrir a manguitos exotérmicos y polvo de cobertura. También es muy conveniente, en el momento en que el caldo asoma por la parte baja de la mazarota, llenar directa-

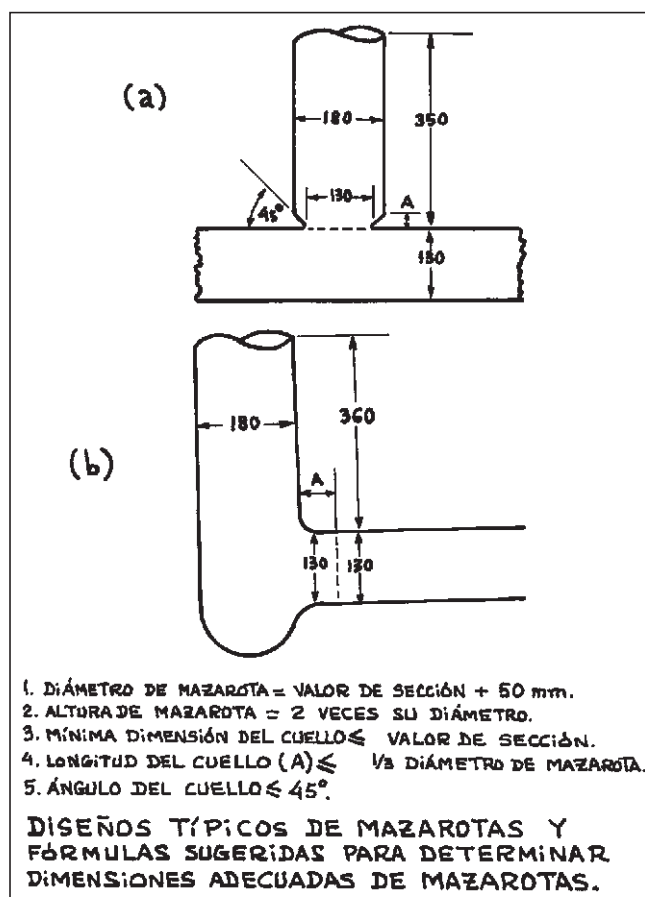


Figura 12.

mente desde la cuchara para tener caldo caliente; esta práctica es aún más exitosa si se "recuela" hasta que la mazarota solidifica o deja de contraer.

La FIGURA 12 (b) muestra el diseño alternativo de una mazarota lateral, la cual suele colocarse en la línea de partición de semimoldes. Cuando surgen problemas de contrasalidas se recurre al empleo de machos. Las dimensiones del cuello son importantes, pero este tipo no es tan sensible como la descrita en el párrafo anterior.

En epígrafe anterior ya se comentó la ventaja que supone, desde el punto de vista de gradiente térmico y rendimiento de alimentación, que el caldo pase por la mazarota antes de entrar a la cavidad de molde. Puede haber problemas de turbulencia que originarían defectos de arrastre y gases. El sistema ataque-mazarota ("whirlgate" o "bebedero de remolino"), representado en la FIGURA 13, es una respuesta efectiva para minimizar la turbulencia del metal cuando entra a la mazarota. Ésta se considera parte de la pieza en un sistema de colada con relación 4 / 8 / 3. A fin de retener la escoria generada en este punto, y siempre que sea posible, el ataque deberá ser perpendicular al cuello de unión mazarota-pieza.

En la parte superior de la misma FIGURA 13 se ve que para reducir aún más la turbulencia, el conducto de unión entre el canal y la mazarota tiene disposición horizontal en la conexión con el canal, y vertical en la conexión con la parte baja de la mazarota. Todas estas mazarotas pueden ser cie-

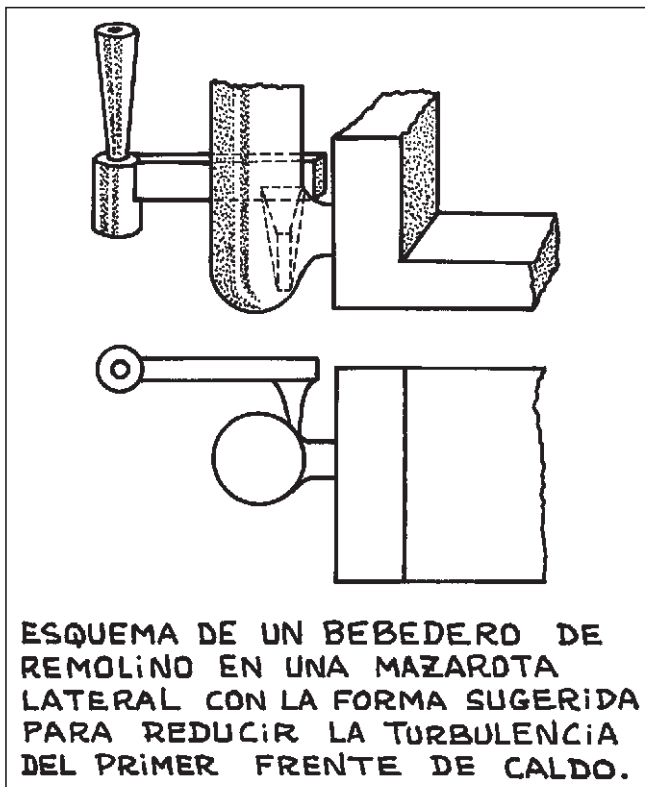


Figura 13.

gas y colocarse allí donde la alimentación sea necesaria. En ese caso no puede adicionarse exotérmico para evitar formación de piel que impediría la acción de la presión atmosférica. El problema se subsana con un corte en la parte superior de la mazarota o con el empleo de machos Williams o "lápiz", que son unos machos cónicos que se proyectan hacia el centro de la mazarota. En ambos casos se crea un punto caliente, incluso en el caso de que la piel del metal se estableciera rápidamente, con lo que puede seguir penetrando presión atmosférica y la mazarota conserva su eficiencia alimentadora el tiempo que dure líquida.

El corte de mazarotas en piezas de nodular, especialmente volantes, es una operación cara y engorrosa, tanto más cuanto mayor sea el diámetro del cuello de unión entre pieza y mazarota. Este problema se reduce bastante mediante el empleo de galletas estranguladoras (machos Washburn) que reducen ese diámetro. El disco perforado (FIGURA 14) se elabora con arena aglomerada (cáscara) o material cerámico refractario. Es lo suficiente delgado como para crear zona caliente en el cuello y mantener la eficiencia alimentadora como si no hubiera reducción de sección. Sin embargo, una vez frío y desmoldeado, el conjunto se desprende y queda una sección de corte que es sólo la del orificio. En el caso de mazarotas laterales el diámetro del orificio puede reducirse hasta ser el 25% del total de la mazarota.

Otro artificio que permite reducir las secciones de corte de coladas sin mengua del rendimiento de alimentación es el ataque o mazarota Connor (FIGURA 15), que en cierto modo podría considerarse como una variante de los bebederos "flash". Su empleo requiere trabajar con un buen

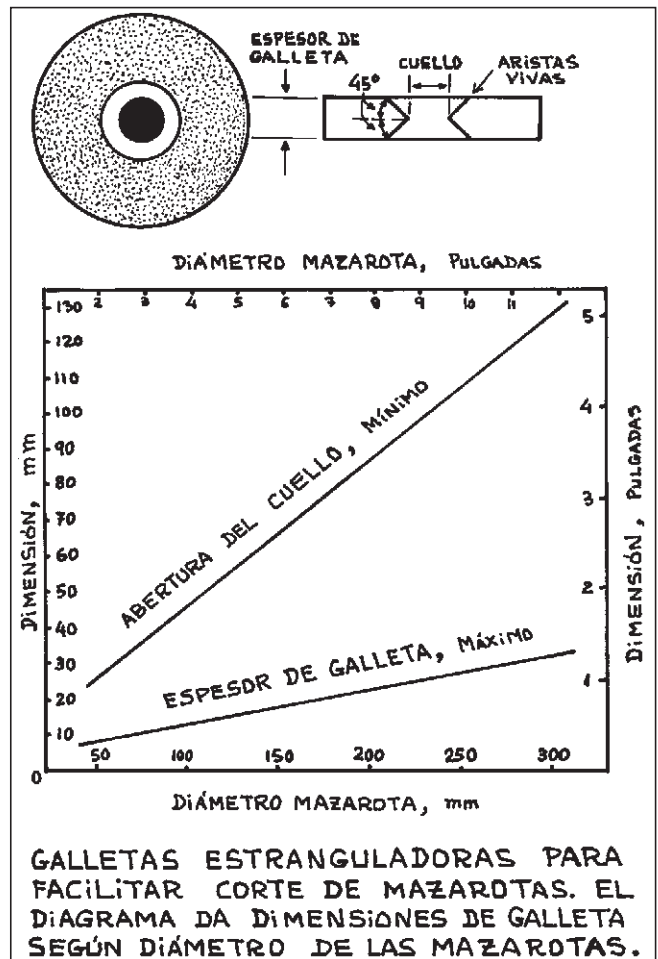


Figura 14.

equipo de modelos y cajas, ya que la anchura del solape entre ataque y pieza es crítica. Esta anchura o clareo es de 1,5 mm, aproximadamente, sin sobrepasar en ningún caso

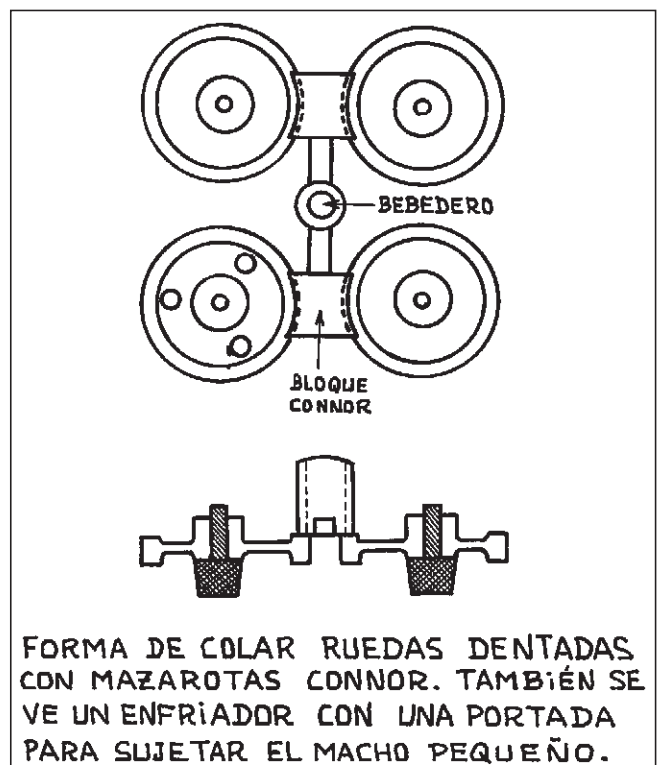


Figura 15.

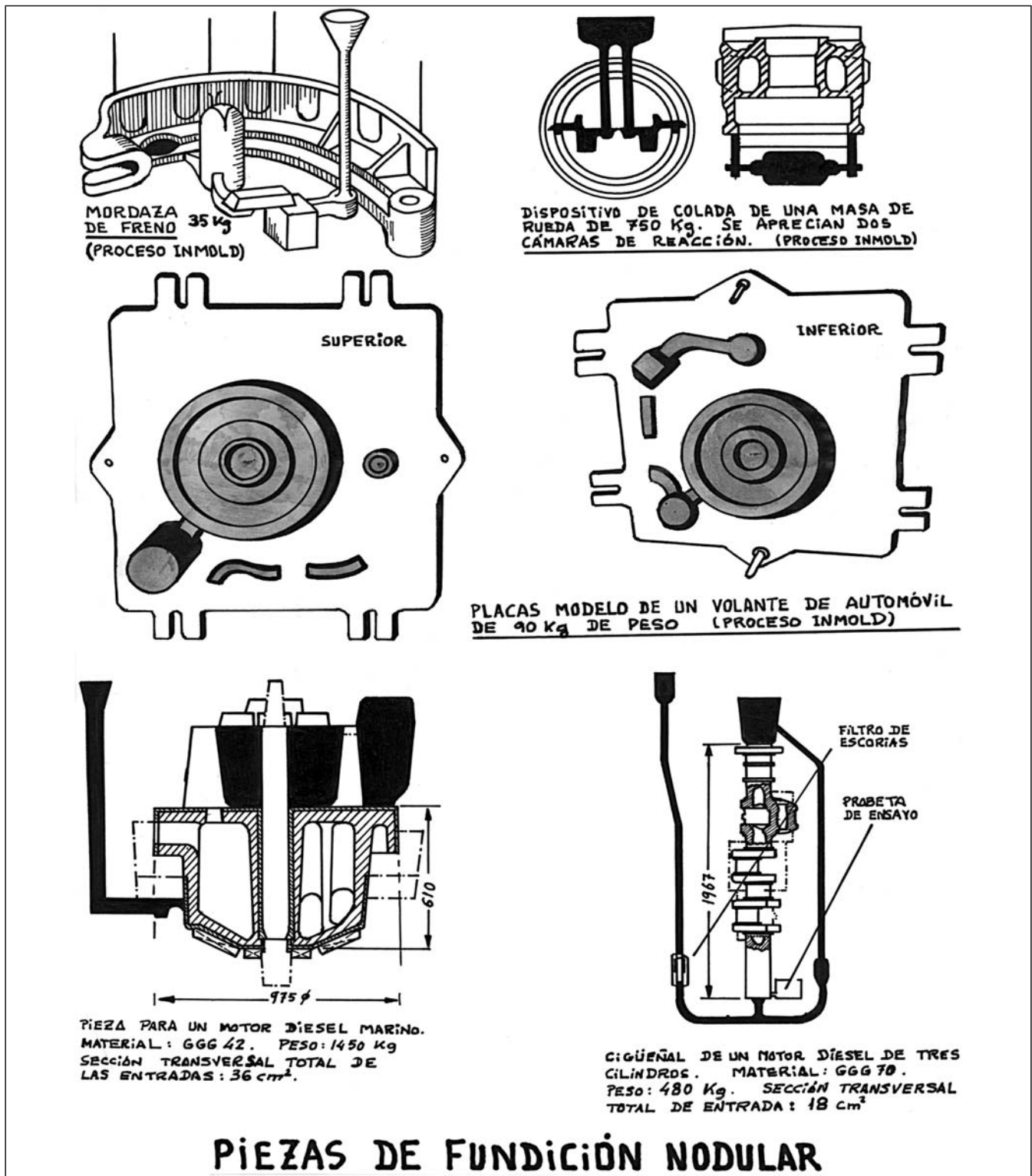


Figura 16.

2,5 mm. La longitud del solape debe ser tal que determine una sección (longitud x anchura) que resulte en una velocidad de llenado igual a la prescrita en una entrada normal.

La eficiencia de este tipo de mazarota o ataque depende de que exista suficiente arena recalentada en la zona vecina a la entrada. Aunque parezca un contrasentido, esto se da en grado tanto más acusado cuanto más pequeño es el claro. Puede aparecer defecto en forma de grieta en caliente en la zona de contacto, defecto que se extiende a lo largo del solape. Esta dificultad puede solventarse reduciendo la longi-

tud del solape para disminuir la velocidad de colada, con lo que se calienta más la arena de la zona; también se puede poner una mazarota circular en la parte baja del molde para crear artificialmente una zona caliente.

Las FIGURAS 16 y 17 aportan ideas sobre diseños de sistemas de colada y alimentación para piezas de fundición nodular moldeadas tanto en máquina como manualmente.

(Continuará)

# F

## PRÁCTICA DE FUNDICIÓN: FABRICACIÓN DE FUNDICIÓN NODULAR (Parte II)

José Luis Enríquez  
Enrique Tremps

### PRESENTACIÓN

En lo que sigue se desarrolla una monografía sobre aspectos prácticos de la fabricación de piezas moldeadas de fundición con grafito esferoidal, prestando mayor atención a los métodos de elaboración del nodular, especialmente en lo que concierne a los métodos de nodulización. Este trabajo no pretende ser original; simplemente se intenta hacer una revisión de la tecnología existente a fin de que sea de interés para todos los fundidores involucrados en esta parcela de la fundición.

Dada su amplitud, su publicación habrá de repartirse entre varios números de nuestra Revista. En consecuencia, y para que los lectores sepan qué temas se van a tratar, se detalla el programa o índice de la presente monografía, la cual esperamos sea de la mayor utilidad posible. Como decía aquel cartel en un "saloon" del salvaje Oeste: "No disparen contra el pianista, lo hace lo mejor que puede"...

### Coladas y rebarba

Es notorio que el sistema de colada y alimentación, junto con la ductilidad característica de la fundición nodular, tiene una incidencia muy directa sobre la dificultad y costo de rebarbado. La mayoría de los ataques pueden desmocharse por golpe cuando el alargamiento del nodular medido en el ensayo de tracción es menor del 5%. El empleo de numerosos ataques pequeños en lugar de pocos y grandes reduce los tiempos y costos de rebarbado. Para evitar roturas, en piezas pequeñas y delgadas conviene hacer previamente una muesca o entalla con disco de corte, tanto en bebederos como en mazarotas pequeñas.

En piezas grandes se pueden eliminar las coladas por arco-aire, arco-plasma o soplete de corte por metal pulverizado, teniendo en cuenta las limitaciones dimensionales impuestas por los equipos respectivos. Estas técnicas pueden producir zonas endurecidas en los ataques, las cuales pueden eliminarse por amolado. Las piezas que presentan tendencia a desarrollar grietas en esas zonas por el corte de mazarotas han de precalentarse antes de efectuar la operación de corte.

El empleo de galletas estranguladoras Washburn o de ataques Connor, como ya se citó en epígrafe anterior, facilita enormemente el corte de mazarotas. Casi todas las mazarotas pueden cortarse por golpe y sin necesidad de hacer una muesca previa. En el caso de ataques "flash" la separación entre colada y pieza llega a producirse espontáneamente en la parrilla de desmoldeo.

### FUSIÓN Y COLADA

#### MATERIAS PRIMAS

#### Composición de la fundición nodular

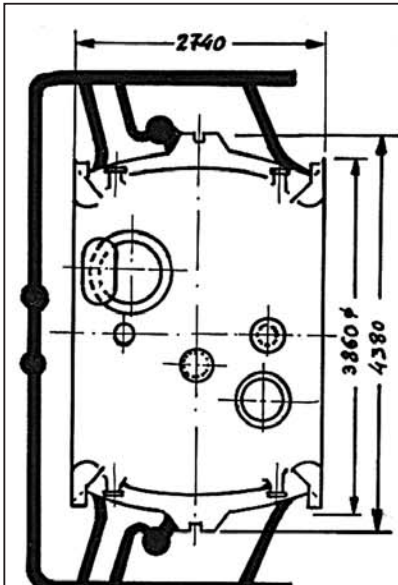
Aunque la composición de la fundición viene condicionada por las condiciones planteadas por el cliente se

dan, a título orientativo, algunas normas generales. Las Tablas 1 y 2, así como las Figuras 18, 19 y 20, aportan ideas sobre composiciones adecuadas para piezas de fundición nodular. Además del hierro hay elementos siempre presentes (carbono, silicio, manganeso, azufre, fósforo), aleantes normales (níquel, cobre, cromo, vana-

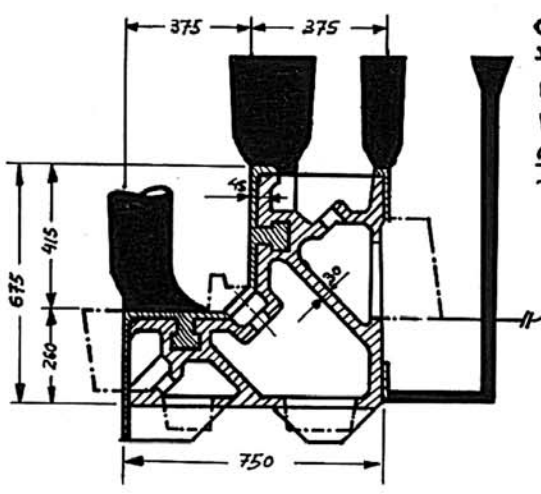
FUNDICIÓN NODULAR EN BRUTO DE COLADA. COMPOSICIÓN SEGÚN ESPESOR Y MATRIZ DESEADA.					
ESPESOR PARED, mm		PERLITA		FERRITA	
MÍNIMO	MÁXIMO	C	Si	C	Si
3	3	4.00	3.75	3.95	4.00
	6	3.70	3.75	3.65	4.00
	12	3.50	3.75	3.35	4.00
	25	3.20	3.75	3.15	4.00
	50	3.05	3.75	3.00	4.00
	75	3.00	3.75	2.95	4.00
	100 ó MÁS	3.00	3.75	2.95	4.00
6	6	3.90	3.25	3.75	3.75
	12	3.70	3.25	3.55	3.75
	25	3.40	3.25	3.25	3.75
	50	3.25	3.25	3.10	3.75
	75	3.20	3.25	3.05	3.75
	100 ó MÁS	3.20	3.25	3.05	3.75
12	12	3.85	2.75	3.70	3.25
	25	3.55	2.75	3.40	3.25
	50	3.40	2.75	3.25	3.25
	75	3.35	2.75	3.20	3.25
	100 ó MÁS	3.35	2.75	3.20	3.25
25	25	3.60	2.50	3.50	3.00
	50	3.45	2.50	3.35	3.00
	75	3.40	2.50	3.30	3.00
	100 ó MÁS	3.40	2.50	3.30	3.00
50	50	3.60	2.10	3.40	2.75
	75	3.55	2.10	3.35	2.75
	100 ó MÁS	3.55	2.10	3.35	2.75
75 ó MÁS	75 ó MÁS	3.60	2.00	3.40	2.50

Tabla 1.

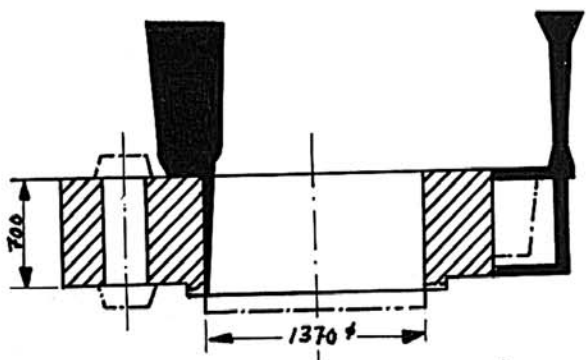




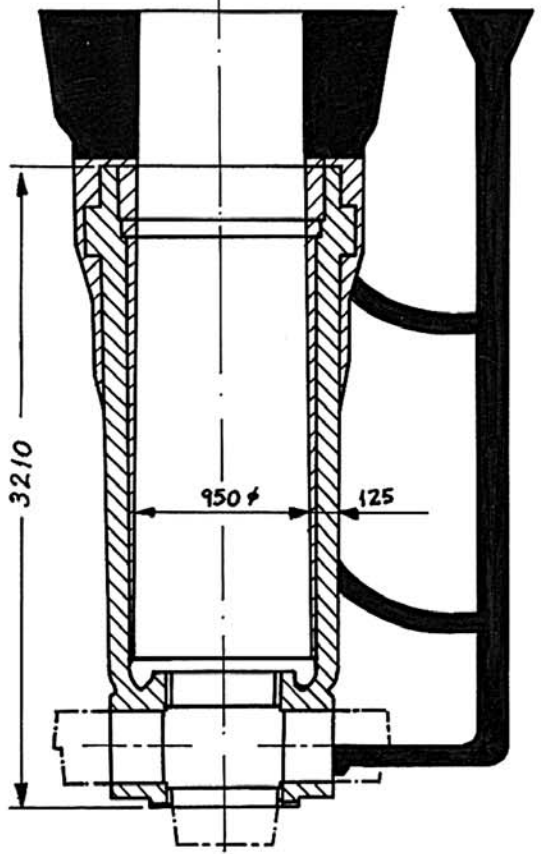
SOORTE DE ALABES DE UNA TURBINA DE VAPOR. MATERIAL: GGG 50. PESO: 11.900 Kg. SECCIÓN TRANSVERSAL TOTAL DE ENTRADAS: 210 cm<sup>2</sup>.



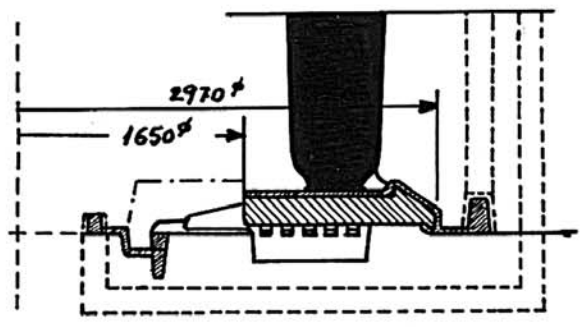
CORTE DE UNA BANCADA DE MÁQUINA NO MAGNÉTICA. MATERIAL: GGG Ni Mn 13-7 PESO DE LA PIEZA: 4.800 Kg SECCIÓN TRANSVERSAL TOTAL DE ENTRADA: 90 cm<sup>2</sup>



PLACA DE PRESIÓN PARA UNA PRENSA DE PLÁSTICO. MATERIAL: GGG 70. PESO DE LA PIEZA: 8.800 Kg. SECCIÓN TRANSVERSAL TOTAL DE ENTRADA: 160 cm<sup>2</sup>.



CILINDRO. MATERIAL: GGG 50. PESO DE LA PIEZA: 11.900 Kg. SECCIÓN TRANSVERSAL TOTAL DE ENTRADAS: 210 cm<sup>2</sup>.



PLACA DE PRESIÓN DE UN GENERADOR. MATERIAL: GGG Ni 22 PESO DE LA PIEZA: 8.200 Kg. SECCIÓN TRANSVERSAL TOTAL DE ENTRADA: 160 cm<sup>2</sup>

## PIEZAS DE FUNDICIÓN NODULAR

Figura 17.



CONTENIDOS DE CARBONO RECOMENDADOS PARA LAS FUNDICIONES NODULARES POCO O NADA ALEADAS CON UN CONTENIDO MÁXIMO ESPECIFICADO DE SILICIO DEL ORDEN DE 2,50%		CONTENIDOS DE CARBONO RECOMENDADOS PARA LAS FUNDICIONES NODULARES POCO O NADA ALEADAS CON UN CONTENIDO MÁXIMO ESPECIFICADO DE SILICIO DEL ORDEN DE 2,75%		CONTENIDOS DE SILICIO RECOMENDADOS PARA LAS FUNDICIONES NODULARES POCO O NADA ALEADAS CON ALTO CONTENIDO DE CARBONO DEL ORDEN DE 4,00%	
ESPOSOR MÁXIMO DE PARED, mm	% C	ESPOSOR MÁXIMO DE PARED, mm	% C	ESPOSOR MÁXIMO DE PARED, mm	% Si
3	≥4,00	3	≥4,00	3	3,75
6	≥4,00	6	4,00	6	2,80
12	3,90	12	3,85	12	2,20
25	3,60	25	3,55	25	1,25
50	3,45	50	3,40	50	0,80
75	3,40	75	3,35	75	0,65
100 ó MÁS	3,40	100 ó MÁS	3,35	100 ó MÁS	0,65

Tabla 2.

dio, molibdeno) y elementos extraños, algunos de ellos muy perniciosos. Su influencia se revisa a continuación.

### Carbono

El hierro base a nodulizar puede ser de composición hipereutéctica, eutéctica o hipoeutéctica. Para piezas pesadas de gran espesor de pared y enfriamiento lento son más favorables las fundiciones hipoeutécticas para evitar segregación de esferoides de grafito. Para piezas de sección delgada y que enfrían rápidamente se va a carbonos equivalentes superiores al eutéctico 4,3, ya que este tipo mejora colabilidad y reduce la probabilidad de formación de carburos eutécticos.

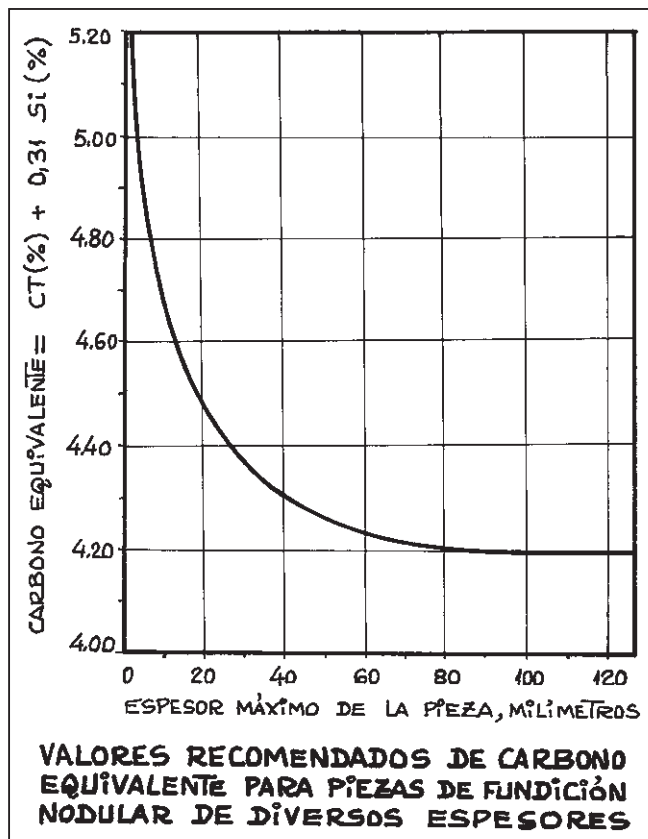


Figura 18.

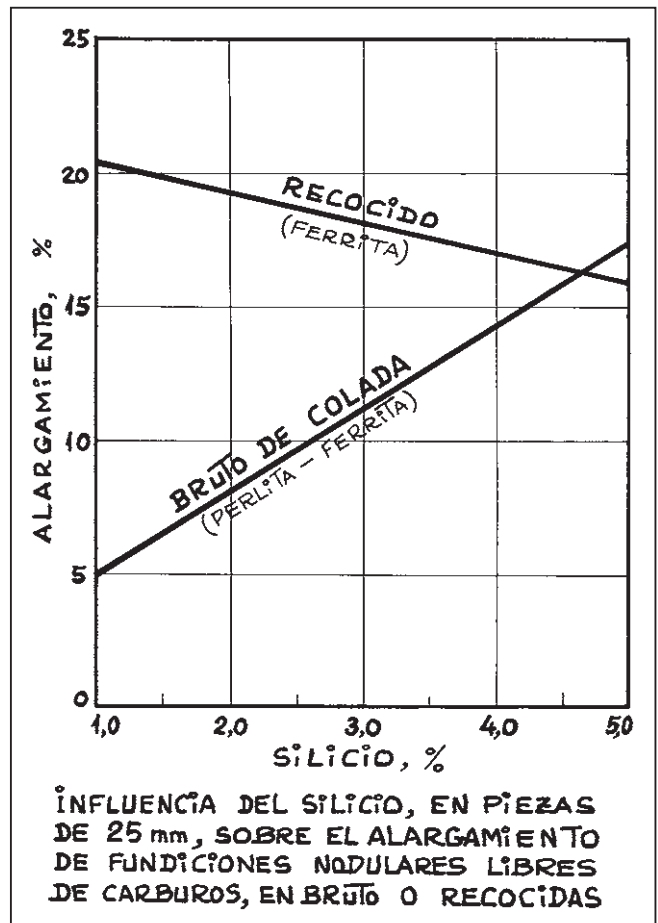


Figura 19.

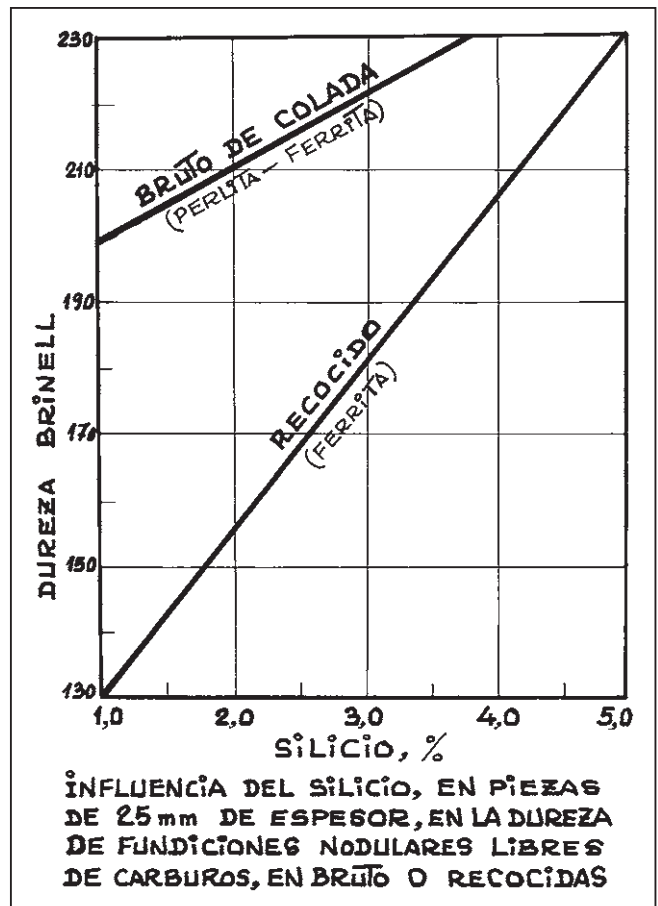


Figura 20.

## Silicio

El contenido final de silicio de las fundiciones después de los tratamientos de esferoidización (aleación de magnesio) e inoculación (aleación de silicio) está en un 2,00 a 2,75%. Valores más altos garantizan fluidez y colabilidad. La aleación inoculante puede añadir un 0,3 a 1,2% de silicio, por lo que el contenido de partida del hierro base debe ser de 1,2 a 2,0%.

## Manganeso

Como el hierro tratado no contiene prácticamente azufre, todo el manganeso presenta queda libre para ejercer efecto aleante y estabilizar la perlita. Para seguridad de formación de ferrita, bien por enfriamiento lento en el molde o bien por tratamiento térmico posterior, es favorable mantener bajos los valores de manganeso. Salvo que se desee obtener fundiciones totalmente perlíticas, el contenido de manganeso en el hierro base no debería ser mayor del 0,3%. En cualquier caso, no debe haber más del 1%, ya que contenidos elevados dan lugar a formación de carburos los cuales reducen seriamente la ductilidad y tenacidad de la fundición con grafito esferoidal.

## Azufre

El magnesio tiene una fuerte afinidad por el azufre, de manera que cualquier contenido de este elemento sustrae magnesio a la reacción nodulizante disminuyendo la eficiencia del tratamiento esferoidizador. Los hierros de cubilote, de no sufrir desulfuración a la salida de éste, tienen un azufre relativamente alto, lo que redundará en mayores consumos de magnesio, disminuyendo la temperatura, aumentando el costo, y menguando drásticamente la calidad de las piezas obtenidas. Como norma general, el contenido de azufre debe ser lo más bajo posible.

## Fósforo

No interfiere seriamente en el tratamiento nodulizador. Sin embargo, un porcentaje mayor del 0,10% deteriora las características mecánicas de las fundiciones. Para obtener máxima ductilidad y resistencia al impacto el contenido de fósforo debe ser lo más bajo posible, siendo aconsejables tenores de menos del 0,05%.

## Níquel

Se añade en proporciones adecuadas para obtener a voluntad fundiciones con matrices ferríticas, perlíticas, bainíticas, martensíticas o austeníticas. El níquel aumenta la carga de rotura y límite elástico de las fundiciones ferríticas y desarrolla propiedades atractivas de tracción, tanto en bruto de colada como después de tratamiento térmico. El níquel incorporado en el tratamiento esferoidizador basado en aleación de níquel-magnesio no impide la formación de ferrita en fundiciones de alta dureza

(bruto de colada) ni en las de dureza media (después de recocido).

## Cobre

Además de ser un fuerte estabilizador de la perlita ejerce efectos desfavorables sobre la forma del grafito.

## Cromo

Generalmente indeseable por ser fuerte estabilizador de carburos, muy difíciles de descomponer mediante tratamiento térmico. No debe exceder el 0,05%, salvo en el caso de piezas (cilindros y otras) que han de resistir a la abrasión o fundiciones austeníticas resistentes a corrosión-erosión.

## Vanadio

Como el cromo, forma carburos estables, y no debe superar el 0,05%.

## Molibdeno

Se añade en proporciones menores del 1% para desarrollar, en combinación con el níquel, las estructuras bainíticas y aciculares características de las fundiciones ADI. Para obtener fundiciones ferríticas el contenido de molibdeno debe ser inferior a 0,05%.

## Elementos extraños

Otros elementos, aún en contenidos pequeños, interfieren en la formación de grafito esferoidal, además de generar otros efectos indeseables. Sus influencias son complejas, y no pueden fijarse con precisión los máximos permisibles al depender en gran parte de la presencia de otros elementos y de factores tales como el espesor de pared de la pieza y su velocidad de enfriamiento. Algunos efectos desfavorables pueden reducirse o eliminarse mediante la adición suplementaria de un 0,005% de cerio en forma de Mischmetall, que puede añadirse separadamente o formando parte de la aleación nodulizante de magnesio.

Para piezas con espesor de pared menor de 80 mm los contenidos máximos de elementos extraños en hierros base destinados a sufrir tratamiento nodulizador son, más o menos, los que siguen:

Aluminio	0,10
Antimonio	0,005
Arsénico	0,10
Bismuto	0,002
Boro	0,001
Estaño	0,03
Plomo	0,002
Teluro	0,01
Titanio	0,04

*Continuará*

# F

## PRÁCTICA DE FUNDICIÓN: FABRICACIÓN DE FUNDICIÓN NODULAR (Parte 3)

José Luis Enríquez  
Enrique Tremps

### PRESENTACIÓN

*En lo que sigue se desarrolla una monografía sobre aspectos prácticos de la fabricación de piezas moldeadas de fundición con grafito esferoidal, prestando mayor atención a los métodos de elaboración del nodular, especialmente en lo que concierne a los métodos de nodulización. Este trabajo no pretende ser original; simplemente se intenta hacer una revisión de la tecnología existente a fin de que sea de interés para todos los fundidores involucrados en esta parcela de la fundición.*

*Dada su amplitud, su publicación habrá de repartirse entre varios números de nuestra Revista. En consecuencia, y para que los lectores sepan qué temas se van a tratar, se detalla el programa o índice de la presente monografía, la cual esperamos sea de la mayor utilidad posible. Como decía aquel cartel en un "saloon" del salvaje Oeste: "No disparen contra el pianista, lo hace lo mejor que puede"...*

Para la formación de grafito esferoidal podrían tolerarse niveles más altos de arsénico y estaño pero, especialmente el estaño, estabilizan la perlita y pueden impedir la formación de ferrita. El arsénico puede mejorar la forma del grafito en piezas gruesas de enfriamiento lento, pero debe mirarse con precaución.

El boro no afecta sensiblemente al grafito pero es un fuerte estabilizador de carburos. En cuanto al plomo y titanio, impiden la obtención de grafito esferoidal, acción que puede mitigarse mediante el Mischmetall citado antes.

Respecto al magnesio, la fabricación de nodular presupone adición a la fundición líquida del magnesio suficiente para que permanezca en ella una cantidad pequeña, pero significativa, de magnesio residual que viene a ser de un 0,020 a 0,060%. En la práctica deben evitarse contenidos excesivos de magnesio, tanto por razones de economía como para impedir la formación de carburos, inoculación excesiva, escoria y formas indeseables de grafito.

Si el contenido de azufre en el hierro base es muy bajo, pueden obtenerse estructuras esferoidales con menos de 0,03% de magnesio residual. Por otra parte, si la fundición tratada se mantiene bajo condiciones adecuadas, las inclusiones flotan sobre el baño y pueden obtenerse fundiciones nodulares con un contenido de magnesio residual de sólo el 0,015%.

### 4.1.2. Composición de las cargas del horno

Los materiales destinados a la elaboración del hierro base deben seleccionarse en función del tipo de horno de fusión y de la composición que se desea alcanzar.

El arrabio (lingote de moldería) es el componente primordial de las cargas de cubilotes ácidos y de hornos ro-

tativos, especialmente en estos últimos cuyas circunstancias de fusión provocan mermas sustanciales de carbono en la fundición. Estas mermas se compensan mediante el empleo de un arrabio alto en carbono, arrabio que deberá ser bajo en manganeso si se desea obtener fundiciones ferríticas en bruto de colada.

En los cubilotes con revestimiento básico se produce un recarburación espontánea del caldo a expensas del coque. En los hornos eléctricos (arco o inducción) se aumenta el carbono mediante la adición de un carburizante a la carga fría o a la fundición líquida. Estas circunstancias permiten sustituir el arrabio de compra por chatarra de acero suave bien seleccionada. Además de ella la carga se compone de retornos de fundición nodular propia, chatarra de hierro y ferroaleaciones.

Cuando se noduliza con aleación níquel-magnesio el retorno se enriquece en níquel a lo largo de las sucesivas refusiones. En algunos casos esos retornos pueden emplearse como ferróníquel de baja ley en la fabricación de hierros de grafito laminar poco aleados.

### Arrabio

Debe ser del tipo de bajo fósforo, y las concentraciones de elementos perniciosos no deben superar los valores enunciados anteriormente. Algunos arrabios no dan buenos resultados cuando se tratan con sólo magnesio, por lo que deben realizarse tratamientos combinados de magnesio y cerio (mischmetall) y, en cualquier caso, no son muy adecuados para piezas de espesores gruesos. En cuanto al silicio, no debe ser tan elevado que el hierro base resultante tenga un contenido tan alto de este elemento que no permita realizar el preceptivo tratamiento de postinoculación grafitizante.

Los contenidos de manganeso de los arrabios para fundición con grafito esferoidal que ha de ser ferrítica después del tratamiento térmico no deben superar el 0,4%. Para fundición ferrítica en bruto de colada estos contenidos de manganeso no deben ser mayores del 0,10%. Una composición típica de arrabio Sorelmetal de bajo silicio, especial para nodular, es 4,20% carbono, 0,10% silicio, 0,15% manganeso, 0,02% azufre y 0,02% fósforo. El contenido de titanio de los arrabios no debe en ningún caso ser igual o mayor que 0,07%.

## Acero

La chatarra de acero es material básico empleado para la preparación de la fundición base que ha de sufrir el tratamiento nodulizante de magnesio, debido a que es relativamente puro y con bajo porcentaje de elementos perniciosos, con un precio relativamente bajo en comparación con el arrabio. Los tipos de acero varían muy ampliamente desde el acero suave muy puro, empleado en aplicaciones de embutición profunda, hasta los aceros de alta aleación.

Como el acero se compra en forma de chatarra, la posible mezcla de composiciones constituye un peligro y las fundiciones deben establecer fuentes regulares de chatarra de acero de buena calidad. El acero suave de estampación o embutición se vende frecuentemente en forma de paquetes. Una fuente de excelente acero para nodular es la chatarra de transformadores eléctricos, ya que estos equipos se fabrican con un acero de muy bajo nivel de impurezas teniendo la ventaja, además, de contener hasta un 2% de silicio.

También puede ser adecuado el acero suave de construcción de buena calidad, pero hay que vigilar y controlar su análisis. El contenido de manganeso debe ser lo más bajo posible, por lo que a la hora de comprar aceros de construcción, chapa naval o chatarra similar, el contenido de este elemento es uno de los factores primordiales que determinarán su idoneidad como materia prima para fundición nodular. Todas las formas de aceros aleados al cromo, molibdeno o vanadio, así como los que contienen azufre o plomo para arranque fácil de viruta, deben evitarse a toda costa.

## Retornos

Sólo pueden emplearse retornos de fundición nodular, ya que los de laminar pueden tener elevados contenidos de fósforo, cromo y manganeso. A ser posible, deben estar libres de arena pegada, ya que ésta es ácida y contamina la práctica básica.

## 4.2. EQUIPOS NECESARIOS

### 4.2.1. Condiciones generales

Sobre estos aspectos de la fabricación se pueden enunciar las siguientes reglas básicas:

1. Equipo de fusión. Debe ser el adecuado para elaborar hierro base líquido de composición adecuada que, después de los tratamientos consecutivos de nodulización y de inoculación, permita que los moldes se cuelen a temperaturas no inferiores a 1.400 °C. Sólo en el caso de piezas muy grandes se puede trabajar a temperaturas más bajas.
2. Unidad de desulfuración. El equipo adicional para la desulfuración del hierro base puede constar de una cuchara agitadora, cuchara de tapón poroso o cualquier técnica puesta a punto, lo que se describirá ampliamente en capítulo posterior.
3. Sistemas de dosificación y pesada. Se necesita un equipo adecuado para la pesada de todas y cada una de las cargas del horno y materiales de tratamiento, así como para la medida exacta de los pesos unitarios de fundición líquida a ser tratada.
4. Materiales de tratamiento. Se necesitan aleaciones para el tratamiento esferoidizante, capaces de dar resultado satisfactorios, constantes y fiables. En cuanto a inoculantes, lo ideal es un ferrosilicio de 75 a 85% de silicio, con un 1,5 a 2,0% de aluminio y 0,5% de calcio, y con granulometría adecuada.
5. Cucharas. Es deseable que las cucharas de tratamiento tengan una altura, como mínimo, 1,5 veces mayor que su diámetro y estén equipadas de piqueta tipo tetera o cualquier otro sistema de atrape de escoria.
6. Control de temperatura. Se necesita un pirómetro, preferiblemente de inmersión, para medir la temperatura del caldo, tanto en el horno o antecrisol como en la cuchara.
7. Caracterización y control. Se necesita equipo para preparar muestras de ensayo para la determinación de composición química, microestructura y propiedades mecánicas. Aquí va incluido el mecanizado de probetas, pulido metalográfico y de espectrometría, etc.
8. Laboratorio de control. Además de las facilidades citadas en el punto anterior, se contará con analizadores químicos (incluso para magnesio) por espectrometría de emisión, microscopio metalográfico y máquinas de ensayo de dureza y tracción, como mínimo.
9. Tratamientos térmicos. Puede ser necesario un horno para realizar tratamientos de alivio de tensiones, recocido, revenido y normalizado, con un control y regulación exactos de las temperaturas de operación. Es deseable que cuente con artefacto de programación. Si se van a fabricar fundiciones ADI se precisan equipos para tratamiento de austemperado. Los hornos calentados a gas o electricidad son preferibles por permitir una regulación más exacta de la temperatura del horno.



#### 4.2.2. Hornos de fusión

La fusión para obtención de un hierro base apto para tratamiento con magnesio que lleve a una estructura plenamente esferoidal ha de ajustarse a la consecución de los siguientes objetivos:

1. Contenido final de carbono de 3,5 a 4,0%.
2. Azufre lo más bajo posible, preferiblemente menor de 0,01% y, por supuesto, siempre inferior a 0,04%.
3. Temperatura, en el momento del tratamiento, superior a 1.450 °C.

Estas condiciones pueden ser satisfechas por los siguientes hornos o combinaciones de hornos:

- a. Hornos de crisol basculante a gas o gasóleo, escasamente utilizados.
- b. Hornos de reverbero, prácticamente desaparecidos.
- c. Hornos rotativos a gas o, cada vez menos, a gasóleo.
- d. Cubilote operado en marcha básica.
- e. Cubilote operado en marcha ácida pero en dúplex con unidad de desulfuración y con horno de sobrecalentamiento.
- f. Hornos eléctricos de arco y, sobre todo, de inducción.

La unidad de fusión más versátil es el horno eléctrico, bien de arco o bien de inducción. Salvo caso de piezas muy grandes, el horno de inducción es la solución más difundida. Una buena elección actual es el horno de inducción de crisol sin núcleo operando a frecuencia media o alta (a veces frecuencia de la red o triple). Frecuentemente, para mayor continuidad de suministro, especialmente en fundiciones de moldeo mecánico, el horno de crisol actúa como unidad primaria de fusión trabajando en dúplex con un horno de inducción a canal que realiza funciones de mantenimiento y ajuste de composición y temperatura.

Los hornos de reverbero fueron muy empleados por los fabricantes de piezas como cilindros, válvulas de mariposa, bancadas de grandes máquinas herramienta, etc., que necesitan, en forma discontinua, cantidades muy grandes de caldo para fabricar un número muy pequeño de piezas pesadas. Hoy día han sido sustituidos por hornos rotativos que trabajan en dúplex con hornos de inducción de crisol o canal de gran capacidad de almacenaje.

El cubilote representa probablemente el medio más económico de fundir un gran volumen de hierro en forma continua. Para la fabricación de fundición nodular los cubilotes operados en marchas básicas suministran un hierro base de calidad aceptable gracias a las elevadas tasas de recarburación y desulfuración que se derivan de la química del proceso. Normalmente trabajan en dúplex con un horno de inducción a canales que actúa como unidad de mantenimiento. Ésta hace también de amortiguador de las variaciones instantáneas de compo-

sición y temperatura de la fundición líquida que sale continuamente por la piquera del cubilote.

El trabajo de cubilote con revestimiento ácido, sea de viento frío o caliente, implica la operación según escoria neutra o moderadamente ácida, circunstancia que incide desfavorablemente sobre el rendimiento recarburador y desulfurador. Se obtiene un hierro con elevado contenido de azufre poco apto, en consecuencia, para la elaboración de fundición nodular. En tiempos no muy lejanos se han puesto a punto métodos eficaces de desulfuración externa del cubilote, especialmente los basados en cuchara agitadora o cuchara con tapón poroso. De ellos se hablará más adelante.

Este desarrollo ha dado lugar a un aumento en el empleo de unidades de fusión que trabajan en dúplex. Por ejemplo, puede usarse un cubilote estándar de viento frío y revestimiento ácido para fundir una carga basada en chatarra de acero y retornos de fundición nodular. El metal que surge por la piquera, con una composición del orden de 3,3% de carbono, 1,5% de silicio y más de 0,1% de azufre, ha de sufrir un tratamiento que aumente el contenido de carbono y reduzca el de azufre. Esto se paga con una disminución de la temperatura que se corrige transfiriendo el caldo a un horno de inducción de crisol sin núcleo y de frecuencia de la red o a uno de canal en el que se sobrecalienta y se hace el ajuste de composición.

## 5. DESULFURACIÓN DEL HIERRO BASE

### 5.1. JUSTIFICACIÓN DE LA DESULFURACIÓN

La fabricación de fundición nodular se basa en un tratamiento que implica la introducción de magnesio o aleaciones portadoras de magnesio en la fundición líquida. Parte del magnesio se vaporiza y arde al emerger del baño. Otra parte, al ser este metal un fuerte desulfurante, reacciona con el azufre presente en la fundición líquida. En consecuencia, sólo queda una parte residual de magnesio para actuar como agente de nodulización.

Esta doble pérdida de magnesio explica la necesidad de adicionar una cantidad de este metal (o sus aleaciones) bastante mayor que la teóricamente precisa.

La consideración del hecho de que el azufre neutraliza y anula un metal caro como es el magnesio, hace aconsejable desulfurar la fundición líquida antes de efectuar la nodulización. Entre otras, aparecen las siguientes ventajas:

- No se forma escoria de sulfuro de magnesio deletérea para la calidad de las piezas obtenidas.
- Disminuye consumo específico de nodulizante.
- El exceso de magnesio originaría carburos en la matriz y defectos (pinhole...) en la pieza.

No parece que el problema se plantee de una manera general, y para efectos prácticos se admite que contenidos de 0,07 - 0,12% de azufre no perjudican el comporta-



miento del hierro gris. Hay algunos casos en los que es fundamental desulfurar, como:

- Fundiciones para lingoteras.
- Hierros de cubilote destinados a ser convertidos en acero.
- Hierros base para fundiciones nodulares.

En los dos primeros casos es admisible un contenido de 0,02 - 0,04%. Sin embargo, la presencia de cantidades de azufre, por escasas que sean, en fundiciones destinadas a ser nodulizadas, puede presentar graves inconvenientes. Ya se ha citado el consumo adicional de nodulizante y los defectos derivados de la mala decantación de escorias sulfurosas. Por ello es preciso desulfurar a fondo hasta llegar a contenidos inferiores a 0,01% de azufre.

Esta desulfuración a fondo es necesaria cuando se fabrican fundiciones nodulares ferríticas en bruto de colada, ahorrando costosos tratamientos térmicos. Para ello hay que partir de contenidos mínimos de manganeso en la fundición de partida, lo que conlleva la condición de minimizar los porcentajes de azufre. Cuando se trabaja con hierros base bien desulfurados el ahorro puede llegar a ser del 50%. Además de este factor económico el ahorro de magnesio repercute en mejora de calidad. En efecto, el magnesio que reacciona con el exceso de azufre forma sulfuro difícil de decantar y que permanece como inclusión en el metal. Son conocidas las manchas negras que aparecen al mecanizar los cilindros de laminación.

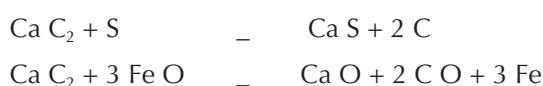
## 5.2. DESULFURACIÓN INTERNA EN EL CUBILOTE

### 5.2.1. Comportamiento del carburo

En la fusión en cubilote el carburo, como la caliza y el espato, da un hierro desoxidado y desulfurado, ideal para fundiciones nodulares, ya que la reducción de la cantidad de nodulizante justifica el costo del carburo. Mayor temperatura del metal y posibilidad de alcanzar tasas más favorables de recarburación y desulfuración hacen posible emplear materiales de carga más baratos, cuyos ahorros justifican ampliamente el costo de los fundentes.

A diferencia de otros fundentes secundarios, el carburo no funde en la parte superior del cubilote y sólo comienza a ser reactivo cuando desciende hasta la franja superior de la zona de fusión. Como funde, su reactividad depende de la superficie de contacto con las gotas de metal y escoria. Por ello debe dejarse un tiempo adicional para que se haga reactivo, o añadirlo previamente a las cargas que se desea tratar.

Las reacciones que se producen por contacto en la zona de fusión dan adsorción de azufre desde el metal, reducción del contenido de FeO en el metal, cesión de carbono a éste, aportación de basicidad a la escoria y aumento de temperatura de las gotas de caldo:



Las gotas que descienden se desoxidan y quedan más básicas. Parece que se da alguna combustión del carburo con aire. El carburo es un eficiente desoxidante y desulfurante, y pequeñas cantidades de éste en las escorias dan lugar a un elevado coeficiente de reparto entre escoria y metal. La capacidad desoxidante del carburo elimina el FeO. Se forma CaO que reacciona según:



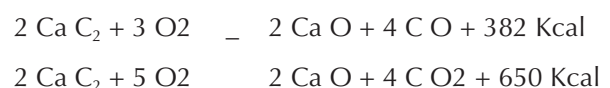
### 5.2.2. Mecanismo de la desulfuración

Para tener hierro caliente desde la primera picada se añade un 5% de carburo sobre la cama de coque y un 4% en la primera carga. A partir de ahí se añade 1,5 - 2% por carga, en función de la marcha del cubilote y necesidades de fabricación. Las últimas cargas se hacen sin carburo.

El carburo atraviesa sucesivamente, sin alteración esencial, las zonas de carga, precalentamiento y fusión del horno. El efecto del vapor de agua (humedad evaporada) sobre la superficie del carburo es mínimo, ya que está recalentado al encontrarse con los gases y llamas ascendentes. La formación de acetileno C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> por reacción del carburo con agua se extingue súbitamente por encima de 100 °C formándose sobre los granos capas protectoras de carbonato cálcico CaCO<sub>3</sub>. Cuando está al rojo deja de formarse acetileno; la escasa porción que se produce se descompone térmicamente en carbono (hollín) e hidrógeno.

El intervalo de ablandamiento y fusión del carburo cálcico para fundición se encuentra en 1.600-1.700 °C, rango que se da en la zona de máxima temperatura de los cubilotes de viento frío. Es aquí donde el carburo se licúa y desciende entre los huecos que deja el coque de la cama, quemándose al encontrarse con la corriente de aire ascendente.

La combustión del carburo cálcico líquido es muy viva; la ignición comienza en la misma superficie de los granos de carburo en fusión, y el calor liberado completa la fusión de dichos granos en un tiempo mínimo. Al aproximarse al plano de toberas, el carburo descendente llega a una zona de atmósfera más rica en oxígeno, quemándose entonces rápida y completamente. Se forma una "cortina flameante" de carburo cálcico al quemarse inmediatamente encima del plano de toberas según las reacciones:



La primera reacción aporta 2.980 kilocalorías por kilogramo de carburo y la segunda 5.080. El óxido de calcio formado se diluye en la escoria y el monóxido y dióxido de carbono se incorporan a los gases que escapan del horno. Con ello queda consumido el carburo cálcico, el cual no produce los efectos metalúrgicos directos. El único efecto primario derivado de la combustión del car-

buro es la formación de una zona de temperatura más elevada, bien delimitada y situada inmediatamente encima del plano de toberas. Observaciones y cálculos han mostrado que la temperatura máxima alcanzada en esta zona con adición de un 2% de carburo es 100 - 150 °C más alta que sin adición, oscilando entre 1.750 y 1.800 °C.

Consecuencia inmediata del descenso de la zona de máxima temperatura provocado por la combustión del carburo es la variación del perfil de desgaste del revestimiento. Este profundo desgaste periforme es tan característico que sirve como herramienta de verificación del desarrollo regular de la combustión del carburo (Figura 21).

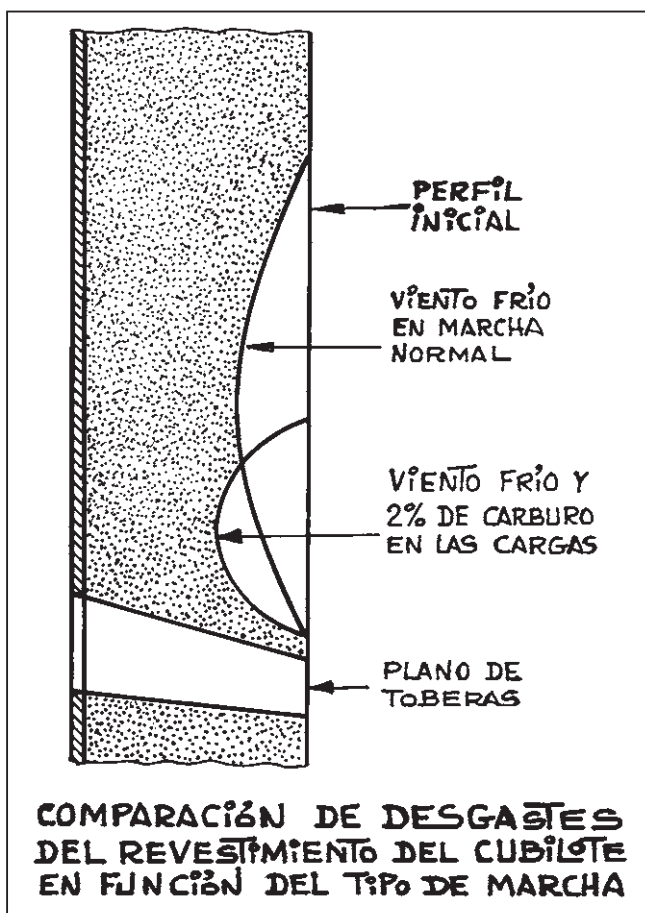


Figura 21.

### 5.2.3. Resultados obtenidos

Las variaciones observadas al añadir carburo cálcico en cubilote ácido de viento frío son equivalentes, en lo que al proceso de fusión y fundición elaborada concierne, a los resultados que se obtienen al pasar a cubilote de viento caliente. Entre otras, puede citarse:

Mayor temperatura de hierro y escoria en piquera, gracias a la transferencia directa de calor.

Esta mayor temperatura aumenta la velocidad de difusión del carbono del coque y la tasa de recarburación.

La baja extensión de la zona de fusión acorta el tiempo en que las gotas de fundición están sometidas a la in-

fluencia del oxígeno del viento lo que, a su vez, repercute en menores mermas de silicio.

Adicionalmente se estimula la reacción endotérmica de reducción de la sílice  $\text{SiO}_2$  por el carbono, para aportar silicio al metal.

Disminución del porcentaje de coque entre cargas gracias a la combustión más intensa del mismo, con lo que habrá, además, menor aportación de azufre a la fundición.

Marcha más regular del horno y constancia de temperatura de la fundición líquida.

La adición de carburo mejora los momentos iniciales de marcha del horno, así como la elasticidad de funcionamiento a régimen en lo que respecta a temperatura y productividad.

Remedia emergencias como paradas de viento, picadas de escoria, etc.

### 5.2.4. Ventajas que se obtienen

El aumento de temperatura en la zona sobre toberas y la disminución del porcentaje de coque entre cargas lleva, a su vez, a la obtención de otras ventajas como:

Mejora de la fluidez de la fundición por la acción sinérgica del aumento de temperatura y contenido de carbono y la disminución del contenido de azufre. Se retarda el comienzo de la solidificación, aumenta colabilidad, disminuye la tendencia al rechupe y mejora la superficie de las piezas obtenidas.

El sobrecalentamiento mejora operaciones diversas de taller, entre las que se cuentan la nodulización y la postinoculación.

La recarburación promovida permite aumentar el contenido de acero en la carga fría del cubilote.

La disminución del contenido de azufre ahorra nodulizante, disminuye tendencia al agrietamiento y corrosión.

### 5.2.5. Condiciones operativas

Respecto a la realización de la desulfuración interna en el cubilote con carburo hay que hacer algunas puntualizaciones:

a) Cantidad de carburo cálcico

Una adición de 20 kg por tonelada (2%) es válida para cualquier cubilote, aunque se suele comenzar con el 4% en las primeras cargas y no se añade ninguno en las últimas.

(Continuará)

# F

## PRÁCTICA DE FUNDICIÓN: FABRICACIÓN DE FUNDICIÓN NODULAR (Parte 4)

*José Luis Enríquez  
Enrique Tremps*

### b) Carga de coque

Una vez fijada la adición de carburo se pasa a optimizar el consumo de coque entre cargas. Para ello se disminuye paulatinamente la relación de coque desde el 14% hasta el 10%, valor que mantiene temperatura y productividad sin necesidad de falsas cargas de coque. Un porcentaje menor podría dar lugar a dificultades operativas.

### c) Carga de caliza

Cada adición de carburo sustituye, por lo menos, a una cantidad equivalente de caliza fundente. Si aparecieran problemas derivados de viscosidad de escoria habría que reducir aún más la adición de caliza.

### d) Caudal de viento

Adición de carburo origina disminución de consumo específico de coque lo que, a su vez, lleva a menor caudal de viento y/o fusión de mayor número de cargas por hora.

### e) Ensayos iniciales

En la primera y segunda cargas suele añadirse un 4% de carburo de cal. De la tercera a la octava se adiciona un 2%. Si el primer hierro sale muy caliente puede reducirse ligeramente la tasa de coque.

### 5.2.6. Cubilote de viento caliente

La adición de carburo cálcico metalúrgico también se ha revelado útil en cubilotes de viento caliente que trabajan con revestimiento y escoria ácidos. Hoy día es fácil prever que el empleo de carburo para el precalentamiento rápido de cubilotes de viento caliente puede llegar a ge-

neralizarse. Las fundiciones con cubilotes de viento caliente están acostumbradas a trabajar con hierro muy caliente y el primer hierro frío, si no hay antecrisol de inducción, lo consideran fuente de problemas operativos de taller.

El cubilote de viento caliente es su propio gasógeno, y pasan treinta o cuarenta minutos hasta que el recuperador se pone a régimen y suministra el viento a plena temperatura. Son pocos los cambiadores de calor provistos de calentamiento auxiliar (gas, gasoil...) para cubrir el tiempo que se tarda en generar suficiente gas en el horno.

Esta misión puede ser desempeñada con éxito por el carburo, y si se añade en proporción del 4% a las dos primeras cargas y 2% de la tercera a la octava se consigue elevar rápidamente la temperatura interior del horno, obteniéndose caldo bien caliente desde la picada inicial.

Estas ventajas son muy interesantes en casos de fundiciones de bajo fósforo y fluidez reducida; para piezas grandes porque facilita el manipuleo de cucharas; y, finalmente, para fundición nodular por hacer más realizables la desulfuración, nodulización e inoculación posteriores.

### 5.3. DESULFURACIÓN EXTERNA DE LA FUNDICIÓN

Los cubilotes ácidos tienen velocidades de fusión relativamente altas cuando se les compara con otros equivalentes que trabajan en marcha básica. Pueden elaborar hierros base con niveles de carbono, silicio y manganeso adecuados para obtener fundición nodular. Sin embargo, los contenidos de azufre no suelen bajar de 0,10%. Esta circunstancia determina un consumo mayor de aleación nodulizante lo que a su vez repercute desfavorablemente en el acabado y calidad de las piezas obtenidas.

Dado que la posibilidad de desulfurar en cubilote de marcha ácida es bastante limitada, es forzoso realizar una desulfuración del caldo a la salida del cubilote. Es lo que se conoce como desulfuración externa, y los procesos disponibles son muy variados, con unos costos de equipos y productos que dependen fundamentalmente, del grado de desulfuración que se pretende alcanzar. En lo que sigue se describen algunos procesos, comenzando por una revisión de los fundamentos generales.

### 5.3.1. Mecanismo de la desulfuración

La desulfuración de la fundición líquida se realiza preferentemente con cal, carburo o una mezcla de los dos. La sosa (cáustica o Solvay) no suele emplearse debido a consideraciones medioambientales. La Tabla 3 compara la eficiencia desulfuradora de carburo y carbonato.

Se trata de reacciones ácido-base y oxidación-reducción, a temperatura alta, en las que el azufre toma electrones para convertirse en sulfuro (azufre pirítico). Hace falta un donador de electrones, que deberá ser un material reductor, y una materia que tenga gran afinidad por el azufre, se combine con él y lo separe del hierro metálico; dicho con otras palabras, un formador de sulfuros. Hay varias alternativas:

- Desulfuración con cal y desoxidación con gas natural (metano).

- Desulfuración con cal y desoxidación con alguna forma de silicio.
- Desulfuración y desoxidación con carburo de cal.

El tercero de los sistemas parece ser el más eficiente, si bien hay que agotar en lo posible el carburo ya que el no consumido puede formar acetileno al entrar en contacto con el agua, circunstancia más espectacular que realmente peligrosa. En cuanto a los métodos empleados, hay dos grandes grupos como son la no forzada y la forzada.

### 5.3.2. Desulfuración no forzada

Deben solventarse algunos problemas comunes a todos los procesos como condición para la fabricación económica de piezas de hierro nodular:

- 1) Debe preverse la recuperación de severas pérdidas de temperatura, para lo cual es preciso disponer de hornos eléctricos auxiliares.
- 2) Han de tomarse medidas para retirar del proceso los materiales desulfurantes agotados antes de emplear el hierro tratado como punto de partida para la obtención de fundiciones nodulares.
- 3) Una vez completada la desulfuración, debe dejarse flotar la escoria hasta la superficie, de la cual pueda desnatarse.

Con mucha frecuencia, los hierros base desulfurados para nodulización posterior requieren ser recalentados en hornos auxiliares (procesos dúplex) antes del tratamiento con magnesio por los métodos convencionales. Esto es particularmente cierto cuando se fabrican piezas de pequeño peso o espesor de pared. Todos los procesos de desulfuración externa presentan un denominador común cual es basarse en reacciones metal-escoria que se darán en la interfase o separación entre ambos elementos. El aumento puramente geométrico de esta superficie de reacción está limitado, como puede suponerse, por las dimensiones de los recipientes en que se realiza.

En consecuencia, la velocidad e intensidad de las reacciones de desulfuración será forzada por un aumento de la interfase de reacción, el cual aumento sólo será posible alcanzar mediante agitación. Todos los sistemas empleados difieren en la forma (y, por lo tanto, costo) de alcanzar esa agitación. La Figura 22 da una idea general de los diversos procedimientos, algunos de los cuales son:

- Desulfuración en piquera (Figura 23).
- Desulfuración en antecrisol (Figura 24).
- Recuchareo.

En estos procesos sólo se pone en juego calor. Por ello, tampoco le es exigible la obtención de elevadas tasas de desulfuración, para lo cual habrá que buscar métodos que procuren mayores grados de agitación.

COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DESULFURADOR DEL CARBONATO SÓDICO Y EL CARBURO DE CALCIO		
FACTOR	PRODUCTO	
	CARBONATO	CARBURO
ESCORIA PRODUCIDA	MUY FLÚIDA, DIFÍCULTAD DE COMPLETA ELIMINACIÓN	GRANULAR, FÁCIL DE RETIRAR
EMISIÓN DE HUMOS	APRECIABLE, EXTRACCIÓN OBLIGADA	NO HAY PROBLEMAS
MERMA DE SILICIO	HASTA 0,3%	MUY PEQUEÑA
PÉRDIDA DE TEMPERATURA	GRANDE	PEQUEÑA, POR SER REACCIÓN EXOTÉRMICA
REFRACTARIOS	MEJOR BÁSICOS	IRRELEVANTE
COSTO EN LIBRAS/Tf	15-20	40-45
PRECAUCIONES DE ALMACENAJE	MANTENER SECO	CUMPLIR LEGISLACIÓN VIGENTE

Tabla 3.



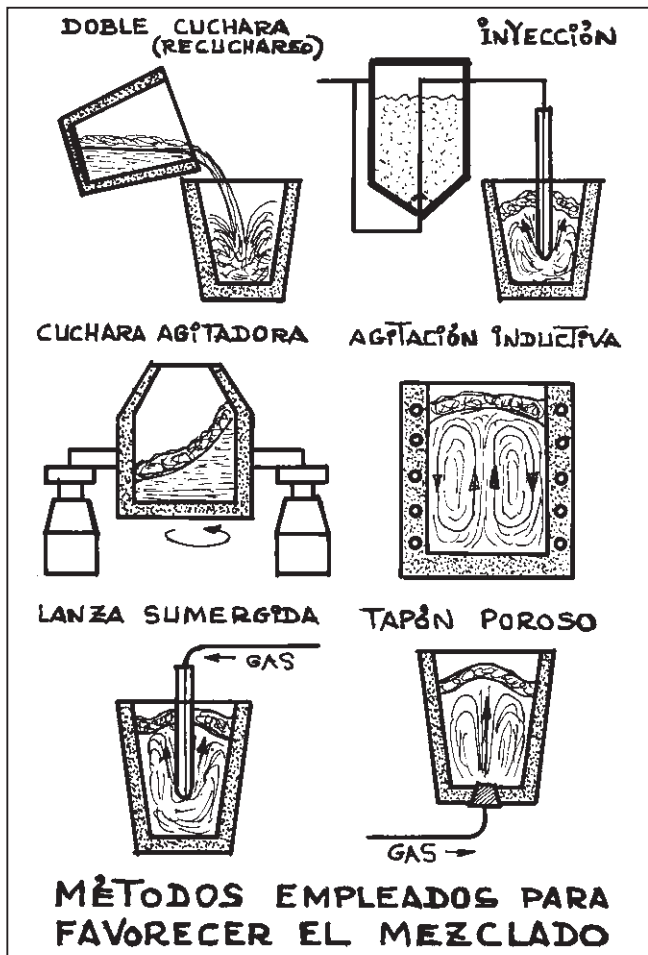


Figura 22.

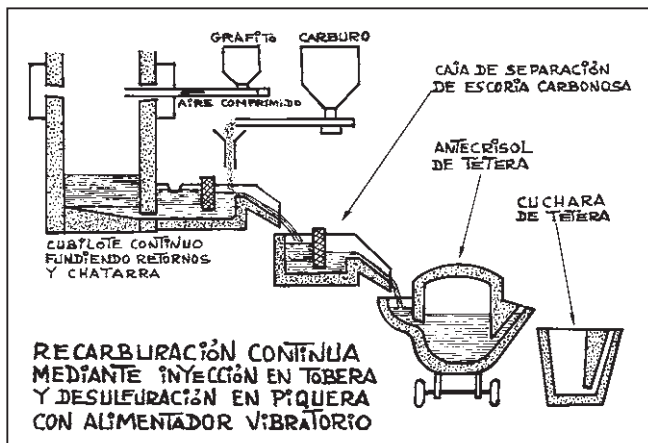


Figura 23.

### 5.3.3. Desulfuración forzada

La búsqueda o generación de interfases de reacción obliga necesariamente a intensificar el grado de agitación y contacto entre los líquidos y los sólidos (Figura 25). Ya no bastan los métodos citados en los epígrafes anteriores. Hay cuatro formas de llegar a esa intensificación:

- Barboteo de gas.
- Agitación mecánica.
- Agitación inductiva.
- Inyección por lanza.

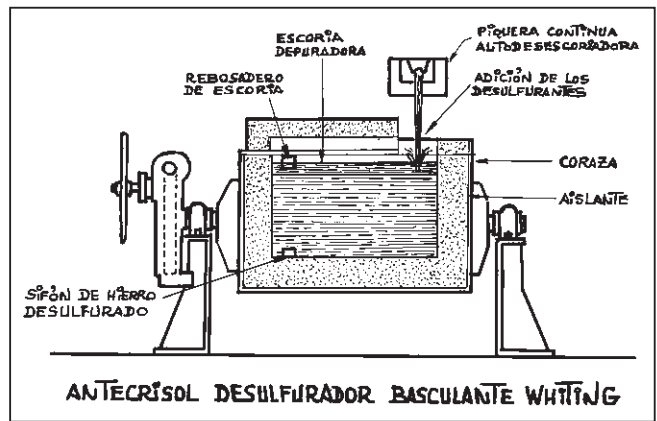


Figura 24.

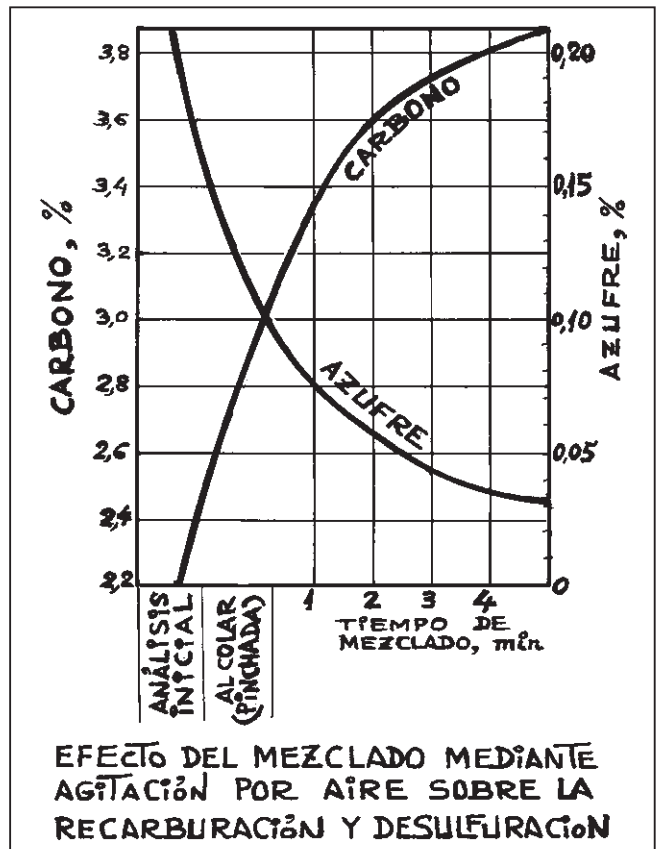


Figura 25.

A continuación se describen algunos procedimientos que utilizan estas técnicas.

#### 1) Agitación por tapón poroso

El sistema desulfurador de tapón poroso se basa en la agitación del metal líquido mediante la introducción de gas inerte (nitrógeno o, mejor aún, argón) en una cuchara o recipiente especial situado bajo la piqueta continua del cubilote. A veces, la propia piqueta del cubilote es la que cuenta con el sistema insuflador de gas. Se utiliza carburo cálcico granular (0,5 – 3 mm) que actúa como desulfurante de forma continua o discontinua. La desulfuración discontinua se hace en una cuchara, provista de tapón poroso de agitación, en el fondo de la cual se coloca una cantidad única de carburo en cada tratamiento (Figura 26).



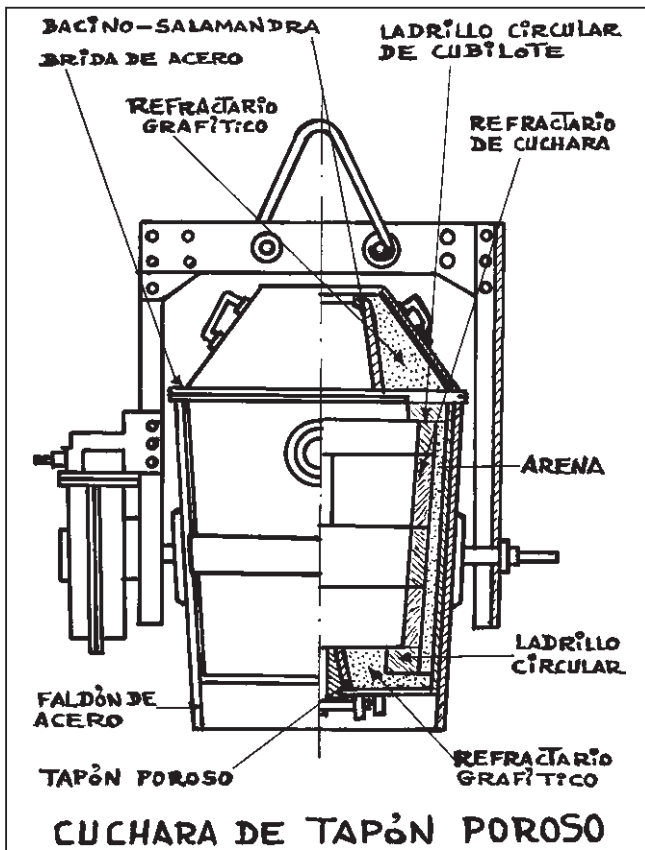


Figura 26.

La desulfuración continua se realiza en un recipiente, especialmente diseñado, dotado de tapón poroso para barboteo de nitrógeno o argón. Las burbujas ascendentes de gas provocan una acción de contacto y mezclado en la

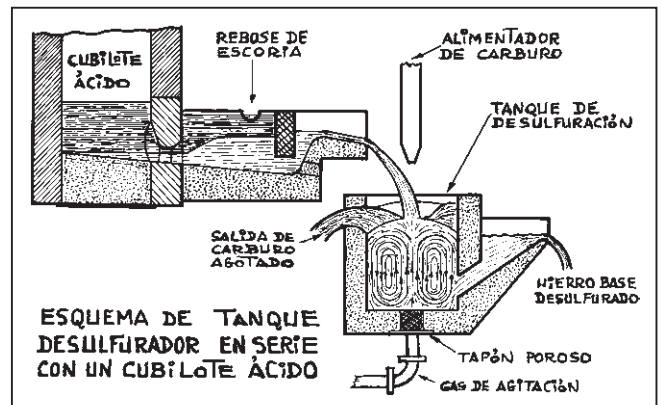


Figura 27.

interfase entre el metal líquido y la adición granular de carburo. Esta circulación del metal acelera la acción desulfuradora y recarburadora del carburo (Figura 27). El sistema supone la alimentación continua del carburo de calcio, mediante un dosificador automático, al vaso de tratamiento. Los equipos están dispuestos de forma que la adición de carburo cae, junto con el chorro de fundición que sale de la piquera, en la "calva" originada por el barboteo de gas en la superficie del baño.

El método de tapón poroso es hoy día de uso general. Debido a las pérdidas térmicas no es favorable para piezas de sección delgada moldeadas a máquina o para tubos, si no se realiza un calentamiento eléctrico previo a la nodulización (Figura 28). Sin embargo, en piezas mayores de 500 kg de peso el proceso es plenamente satisfactorio. Si un agente desulfurante relati-

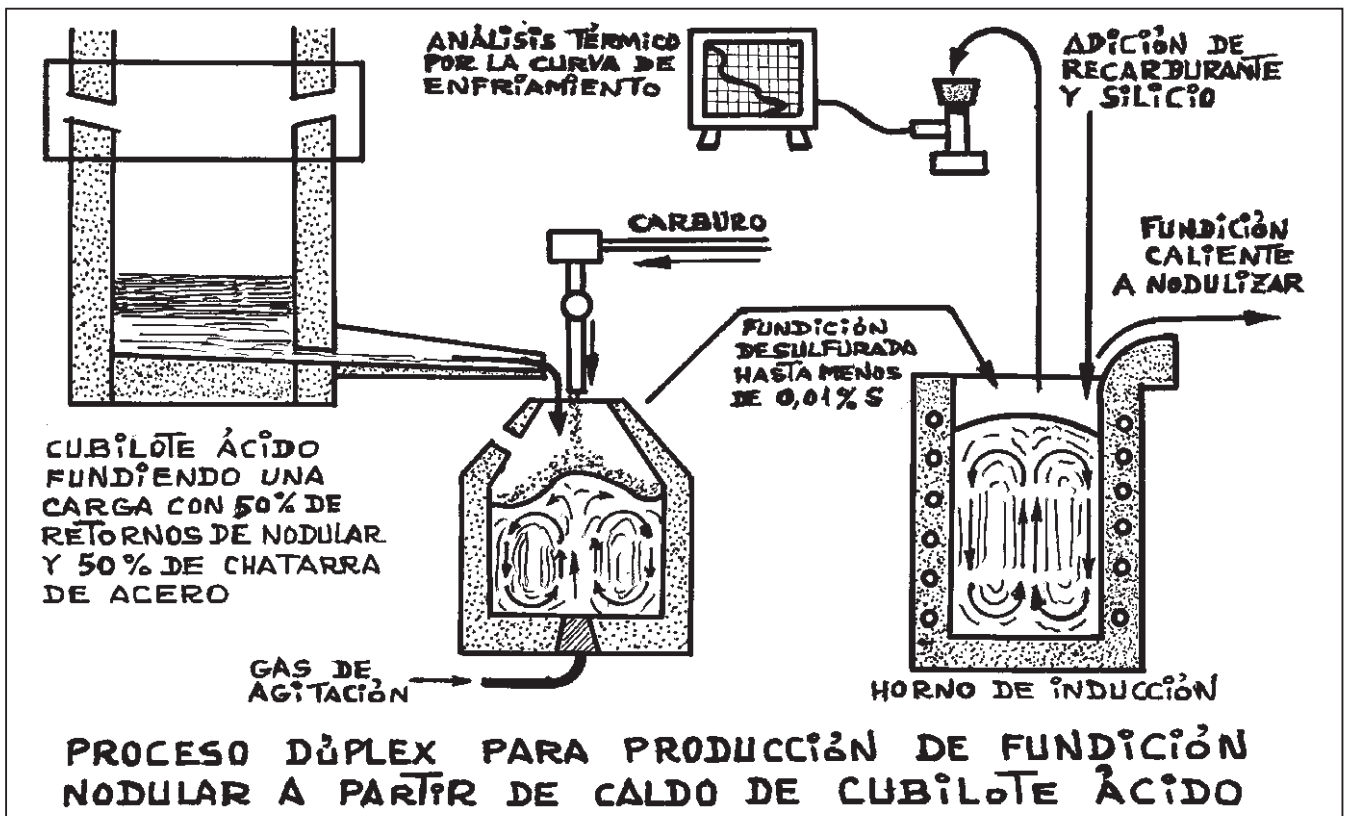


Figura 28.

vamente poco denso, como el carburo de calcio, se echa sobre la superficie agitada del líquido en movimiento, parte del agente será arrastrada hacia abajo, hasta el fondo de la cuchara, mientras que una porción de líquido nuevo se pondrá en contacto con el material desulfurante que aún queda sobre la superficie (Figura 29).

Los tapones porosos son disponibles comercialmente en tamaños estándar. Normalmente están fabricados con alúmina pura, en partículas de tamaño muy calibrado. Se moldean a presión, se secan y se calcinan a temperatura alta. Los tapones pueden operar en continuo a temperaturas que superan los 1.800 °C. Los materiales refractarios porosos utilizados para estos tapones son permeables a los gases, sin dejar de mantener estanqueidad frente al metal líquido. Esto hace que no sea necesario inyectar gas para mantener una contrapresión que impida el escape de la fundición líquida. En función de la capacidad de la cuchara pueden instalarse uno o varios tapones en fondos de cuchara reforzados para asegurar mayor resistencia y rigidez (Figuras 30 y 31).

El equipo de insuflación de gas está compuesto por el bloque de botellas o depósito, regulador (manorreductor) de presión, caudalímetro, tuberías rígidas, tuberías

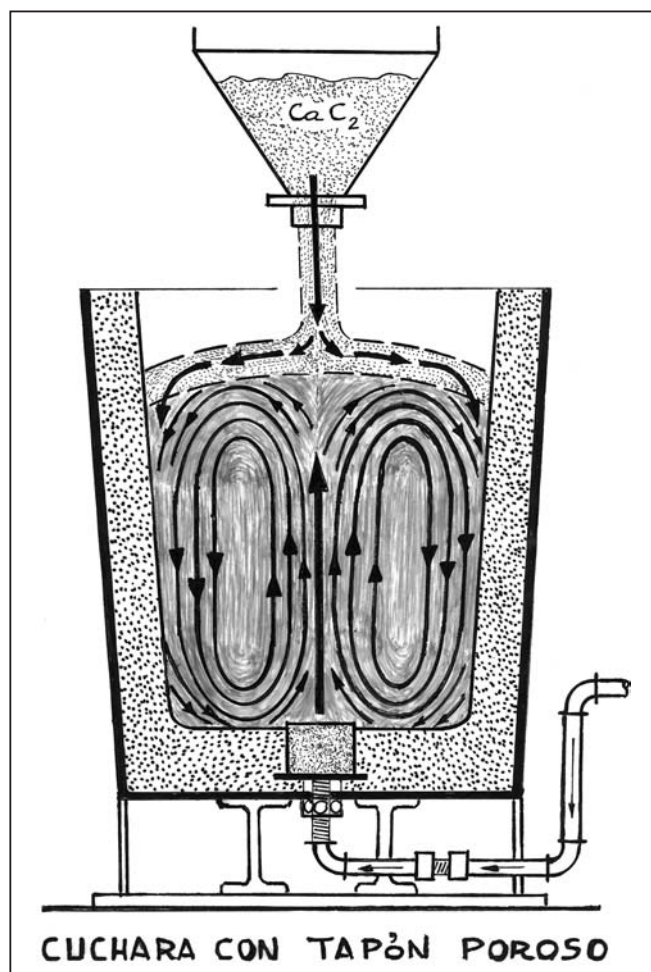


Figura 29.

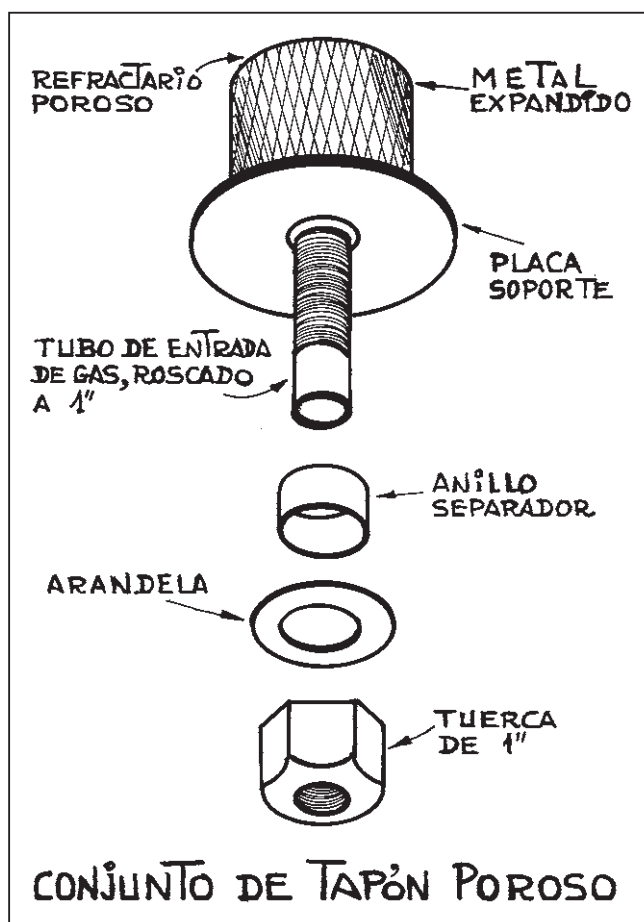


Figura 30.

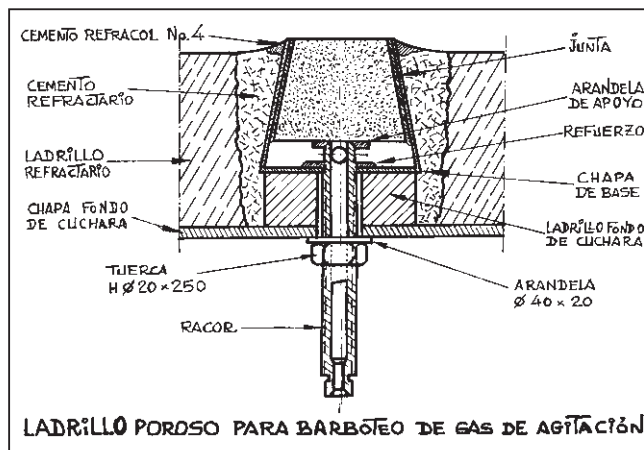


Figura 31.

flexibles y racores de acoplamiento rápido al tubo que alimenta al tapón o tapones. Es conveniente que la cuchara de tratamiento se encuentre situada cerca del horno (Figura 32). El carburo se añade sobre la superficie del baño, mediante un distribuidor emplazado en la piqueta, en el momento en que el metal se cuela a la cuchara. La insuflación de gas de agitación comienza en el mismo momento y se mantiene algún tiempo después de completar el llenado de la cuchara.

(Continuará)

## PRÁCTICA DE FUNDICIÓN: FABRICACIÓN DE FUNDICIÓN NODULAR (Parte 5)

José Luis Enríquez  
Enrique Tremps

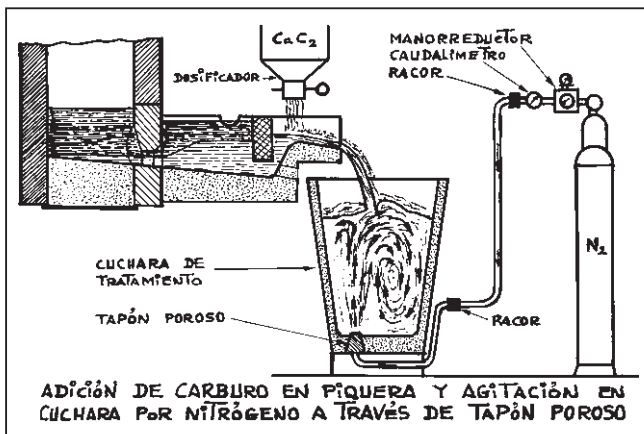


Figura 32.

### 2) Agitación por lanza

Se procede a una agitación enérgica del caldo mediante barboteo de gas a través de él durante unos tres o cuatro minutos. El depósito previo del carburo sobre la superficie del baño hace innecesario cualquier dispositivo de inyección de polvo. Esto disminuye la complejidad de los equipos y, además, elimina el peligro de que se produzcan obturaciones en las lanzas de inyección. El dispositivo es muy sencillo. Está la botella de gas comprimido, manorreductor, caudalímetro, portatubos con uno a tres tubos según tamaño de cuchara y pescante de maniobra. Las lanzas pueden ser de cemento refractario, aunque dan mejor resultado las de manguitos cerámicos con alma de tubo de acero. Mejor son las de grafito, por presentar resistencia mucho mayor al choque térmico. Debe contarse con sistemas seguros y rápidos de acoplamiento, racores, etc. (Figura 33).

### 3) Agitación mecánica Rheinstahl

Es una agitación mecánica para desulfuración, recarbu-

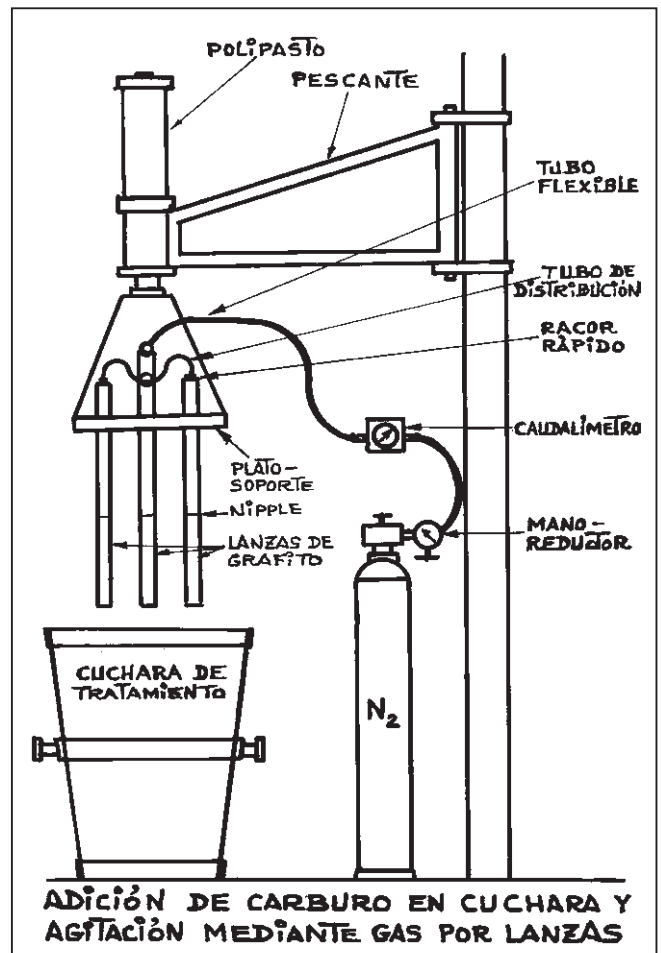
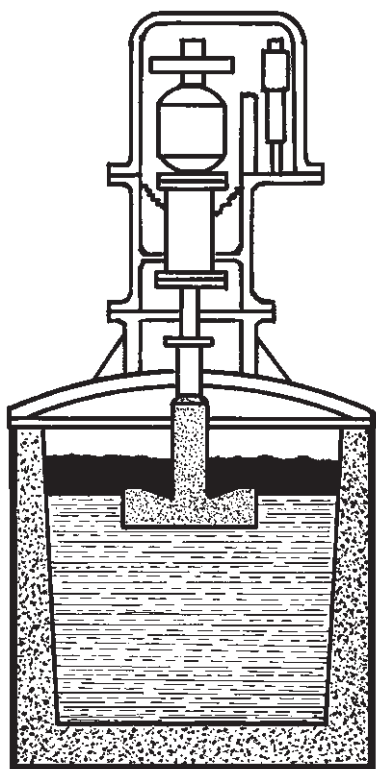


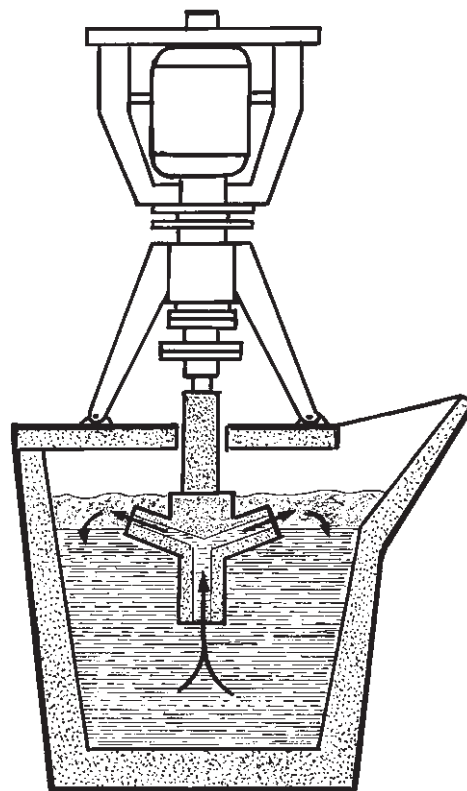
Figura 33.

ración, aleación y tratamiento nodulizante con magnesio. El sistema mejor conocido es el agitador de paletas rectas Rheinstahl. El rotor, relativamente voluminoso, se fabrica con material refractario. Para su operación se sumerge el agitador de paletas en el baño de la cuchara y



**DESULFURADOR RHEINSTAHL  
DE AGITADOR COMPACTO**

Figura 34.



**DESULFURADOR RHEINSTAHL  
CON AGITADOR-TURBINA**

Figura 35.

se le pone a girar a una velocidad adecuada para el mezclado sin llegar a centrifugar (Figuras 34, 35 y 36). Los rotores se fabrican en tamaños adaptados a la desulfuración de hierro base en cucharas de 5 a 20 toneladas de capacidad. Intentos de desulfuración de cantidades menores que 5 toneladas sufrirían pérdidas de temperatura de tal magnitud que la fundición nodular producida a continuación estaría demasiado fría para garantizar un llenado satisfactorio de cavidades de molde de tamaño pequeño o medio.

#### 4) Cuchara agitadora

Tiene forma parecida a un convertidor asimétrico de acería y se mueve con una rotación excéntrica alrededor de un eje vertical (Figuras 37 y 38). El conjunto gira tranquila y continuamente según un movimiento circular excéntrico. En algunas fundiciones, las cucharas agitadoras están revestidas con refractarios de 70% de alúmina para minimizar el ataque o erosión a los mismos. No obstante, consideraciones químicas y cinéticas están llevando a la implantación de revestimientos básicos. El método de desulfuración mediante cuchara agitadora sólo da resultado cuando se tratan cantidades grandes (superiores a 5 toneladas) de metal. Si se van a colar piezas pequeñas suele ser necesario recalentar el metal desulfurado antes de nodulizar con magnesio.

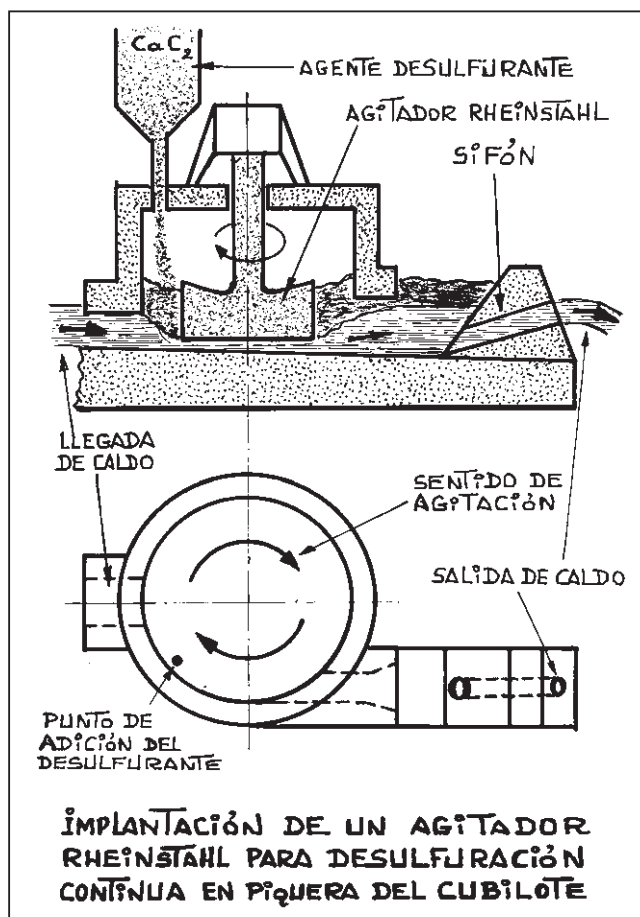
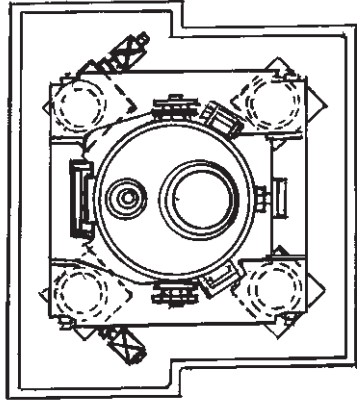
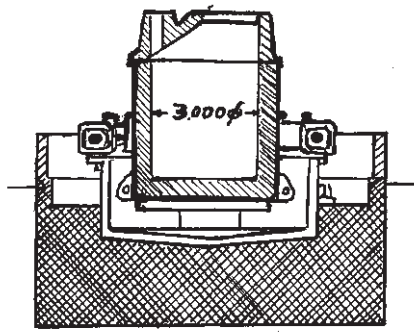


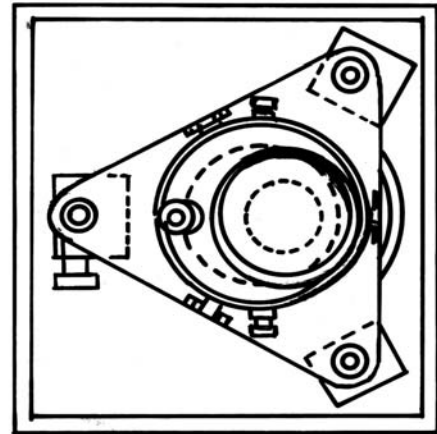
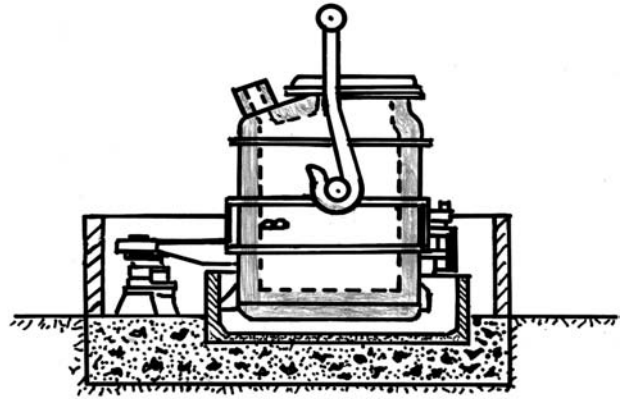
Figura 36.





**CUCHARA AGITADORA CON SOPORTE RECTANGULAR**

Figura 37.



**CUCHARA AGITADORA CON SOPORTE TRIANGULAR**

Figura 38.

### 5) Agitación inductiva

Se realiza en el equipo HTM (High Turbulence Mixer) de Küttner - Junker. En este proceso los metales líquidos están sometidos a un campo inductivo alterno que produce un movimiento intensivo del baño, con lo que las reacciones metalúrgicas son muy eficientes. El campo magnético creado por una o varias bobinas inductoras penetra, a través de ventanas simétricas practicadas en la carcasa del vaso HTM, en la fundición líquida. Este recipiente tiene forma cilíndrica con su eje de revolución dispuesto en posición horizontal (Figuras 39 y 40).

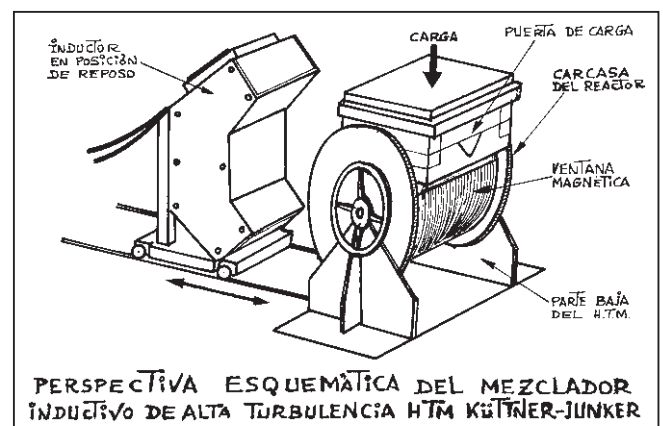
Las intensas corrientes inducidas (con el consiguiente efecto mecánico) hacen ascender el metal líquido a lo largo de las paredes del cilindro, lamiendo éstas, y bajar por la zona central. La ola metálica con su movimiento cilíndrico produce una rompiente en el centro del depósito, y de esta forma succiona los materiales desulfurantes introducidos, los cuales se mezclan íntimamente con la fundición líquida sin que sean necesarios los gases de barrido, lanzas, tapones porosos o agitadores mecánicos. El proceso HTM es apropiado tanto para aplicaciones continuas como discontinuas.

La escoria desnatada en la desulfuración previa a los tratamientos esferoidizantes puede cargarse como escorifi-

cante (castina) al cubilote cuando éste trabaja para fundición gris laminar.

### 6) Inyección con lanza

Se inyecta carburo de 1 - 2 mm en antecrisol o bacino de la piqueta, haciendo uso de argón o nitrógeno como gas portador a través de un tubo protegido por grafito o pasta de carbono amorfo. El equipo a emplear consta de un tanque flui-



**PERSPECTIVA ESQUEMÁTICA DEL MEZCLADOR INDUCTIVO DE ALTA TURBULENCIA HTM KÜTTNER-JUNKER**

Figura 39.

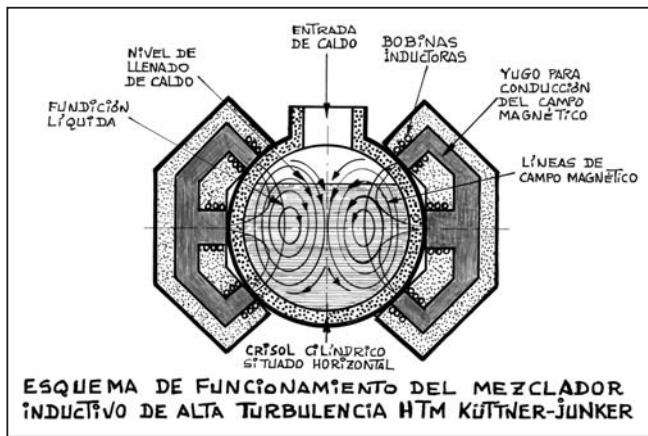


Figura 40.

dizador, similar a los de gunitar refractario, que se conecta a la fuente de gas y sus correspondientes controles de presión, por un lado, y al tubo inyector de grafito, por otro, mediante mangueras de alta presión (Figuras 41, 42 y 43). El tubo inyector se sumerge en el depósito de tratamiento hasta unos 75 mm del fondo. Su posición no debe ser perpendicular, sino que penetra en el baño con un ángulo de 70 – 80%. Esto permite que el carburo que sale del tubo se disperse fácilmente y se minimice la erosión sobre la pared vecina.

## 6. TRATAMIENTO DE NODULIZACIÓN

Objetivo primordial en la fabricación de fundición nodular es la formación de grafito esferoidal mediante la adición de cantidades pequeñas de magnesio, bien puro o bien combinado con otros elementos. La cantidad mínima de magnesio retenido necesaria para producir un grafito esencialmente nodular oscila entre 0,018 y 0,050; viene determinada por los contenidos de azufre y oxígeno del hierro base.

Como es notorio, dada la baja temperatura de vaporización del magnesio, se producen proyecciones y combustión prematura, por lo que se ha dedicado gran esfuerzo investigador en el control de estas circunstancias, actuando sobre las aleaciones nodulizantes o sobre los métodos de adición.

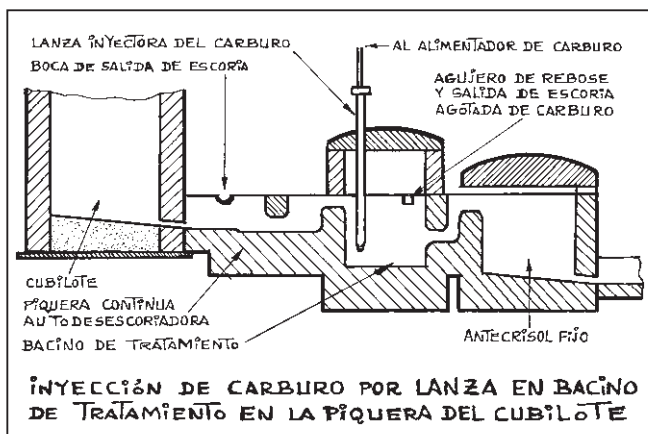


Figura 41.

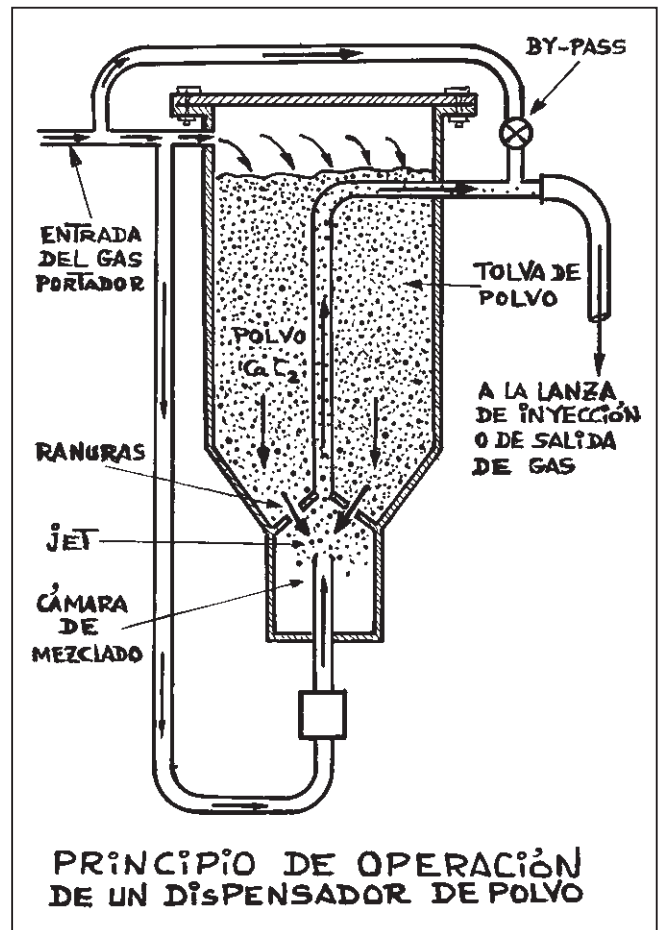


Figura 42.

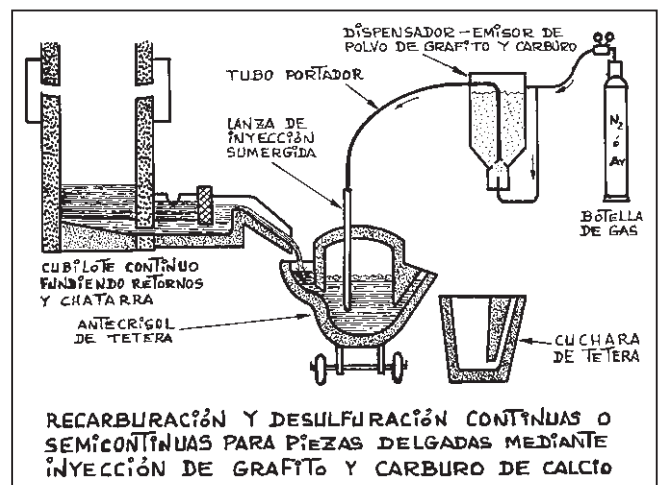


Figura 43.

### 6.1. PRINCIPIOS BÁSICOS Y ALEACIONES ESFEROIDIZANTES

Para conseguir la cristalización del grafito en forma esferoidal, la fundición líquida debe ser sometida a dos tratamientos consecutivos:

- 1) Tratamiento de esferoidización
- 2) Inoculación secundaria

El primero consiste en añadir a la fundición líquida, por los procedimientos que se considerarán más adelante,

una aleación que contenga un elemento esferoidizante. El número de estos elementos es bastante limitado y, principalmente, son el Mg, Ca, Ba, Ce y Sr. Aleando el magnesio con metales pesados como Fe, Ni, Cu o Si, la presión de vapor puede reducirse considerablemente, pero la reacción con la fundición será todavía violenta si la proporción de magnesio en la aleación es superior al 50%. Sólo se evita el peligro con proporciones de magnesio inferiores al 25%.

El punto de ebullición del magnesio puro se sitúa, aproximadamente, entre 1.100 y 1.500 °C, temperatura normal de tratamiento de la fundición líquida, alcanzando la presión de vapor del magnesio las 10 atmósferas. Por ello, la adición de magnesio a la fundición líquida provoca una vaporización explosiva que implica peligrosas proyecciones de metal líquido. El magnesio no puede, por tanto, utilizarse en estado metálico puro excepto si se recurre a técnicas especiales de adición que se verán más adelante. Las aleaciones esferoidizantes más empleadas actualmente pueden clasificarse en varios grupos, según la naturaleza del elemento portador:

1. Níquel como elemento portador:

- 15 Mg - 85 Ni.
- 15 Mg - 30 Si - 55 Ni.

2. Ferrosilicio como elemento portador:

- 5 Mg - 45 Si - 2 Ca - resto hierro.
- 10 Mg - 45 Si - 2 Ca - resto hierro.
- 15 Mg - 50 Si - 4 Ca - resto hierro.

3. Silicio como elemento portador:

- 10 Mg - 65 Si - 6 Ca - resto hierro.
- 18 Mg - 65 Si - 2 Ca - resto hierro.
- 30 Mg - 60 Si - 4 Ca - resto hierro.
- 20 Mg - 36 Si - 20 Ca - 20 tierras raras - resto hierro.

Las aleaciones del tipo Fe Si Ca Mg con 20 a 30% de Ca apenas se utilizan actualmente por ser demasiado ligeras y de reactividad muy débil. Además, se desintegran lentamente por oxidación atmosférica. Hay algunas aleaciones que contienen, además cerio y otros elementos de las tierras raras ("mischmetall") que se emplean para compensar o anular la influencia de otros elementos perniciosos. La composición de esta aleación especial es 44,9% de cerio, 24,5% de lantano, 6,0% de praseodimio, 19,5% de neodimio, 2,1% de samario, 0,5% de itrio.

En cualquier caso, hay que tener en cuenta que la tecnología en este campo está cambiando constantemente, por lo que para estar al día, habrá que consultar a los proveedores.

La cantidad de aleación que debe adicionarse a la fundición líquida para obtener el grafito esferoidal depende de

varios factores, entre los que desempeña un papel preponderante el contenido de azufre, ya que el magnesio presenta mayor afinidad con el azufre que el hierro o manganeso. Por ello, cierta cantidad de magnesio adicionada al baño será consumida por la desulfuración con la formación de MgS. Durante esta reacción, una unidad de azufre se combina con 3 / 4 unidades (0,75) de magnesio.

Se ha comprobado experimentalmente que la esferoidización perfecta requiere la presencia en la fundición de cierta cantidad de magnesio residual, como ya se citó anteriormente, que según las circunstancias oscilará entre 0,03 y 0,06%. Por otra parte, el rendimiento del magnesio no es del 100% sino que depende de la temperatura de la fundición, del proceso de tratamiento empleado y del contenido de magnesio de la aleación. Esto se ve en el siguiente cuadro:

<u>Mg en la aleación</u>	<u>Rendimiento</u>
Mg puro	0
50	10 - 25
8 - 12	20 - 40
8 - 12	40 - 60

Teniendo en cuenta los distintos factores que se acaban de señalar, la cantidad total de magnesio que se necesita adicionar a la fundición para esferoidizar ésta puede calcularse mediante la fórmula siguiente:

$$\text{Mg total} = \frac{0,75 ( S1 - S2 ) + \text{Mg residual}}{\text{Mg recuperado}}$$

en la que S1 es el azufre antes del tratamiento y S2 es el azufre después del tratamiento. Algunas fórmulas más complejas tienen también en cuenta la velocidad de enfriamiento o, en otros términos, el espesor de pared de las piezas y el tiempo que transcurre entre la incorporación del magnesio y la colada de los moldes. La obtención de grafito esferoidal es, efectivamente, más fácil en las piezas delgadas que en las gruesas y masivas.

Por otra parte, la proporción de magnesio residual en la fundición líquida decae progresivamente en función del tiempo, y a razón de aproximadamente 0,001% por minuto, o sea 0,01 cada 10 minutos. Está claro que una fundición colada veinte minutos después del tratamiento debe contener más magnesio residual que otra utilizada poco tiempo después de la esferoidización. De una manera general, a la hora de implantar un método de nodulización hay que prever la resolución de las siguientes dificultades que presenta la adición de aleaciones ligeras a la fundición líquida:

- Bajo punto de fusión y elevada presión de vapor.
- Densidad muy baja y escasa solubilidad en la fundición.
- Gran afinidad por el oxígeno y alta reactividad.
- Recuperación baja y errática de elementos.

- Formación de inclusiones no metálicas perniciosas.
- Tendencia a formar polvo reactivo.
- Reacción pirotécnica violenta y peligrosa.
- Riesgos potenciales para la salud del personal implicado.
- Impacto ambiental bastante desfavorable.

Los procesos de tratamiento nodulizante pueden dividirse en dos grandes grupos, según el producto empleado:

- Procesos que emplean aleaciones de magnesio.
- Procesos que emplean magnesio puro, más o menos protegido.

Las Figuras 44, 45, 46, y 47 representan algunos de los procesos que podrían denominarse convencionales. En la Tabla 4 se comparan características de algunos de ellos.

## 6.2. MÉTODOS DE NODULIZACIÓN

### 6.2.1. Proceso Pour Over

En algunos procesos de fundición es necesario o favorable emplear una aleación de magnesio con un elemento que modere la reacción mediante disminución de la velocidad a la que se liberan los vapores de magnesio al encontrarse con el hierro base. El método más sencillo

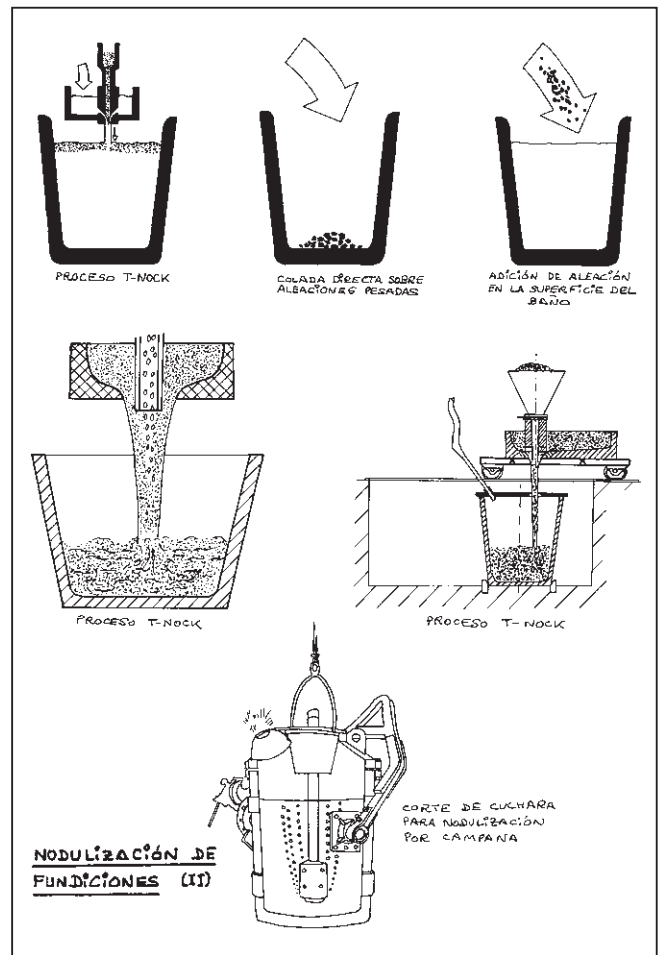


Figura 45.

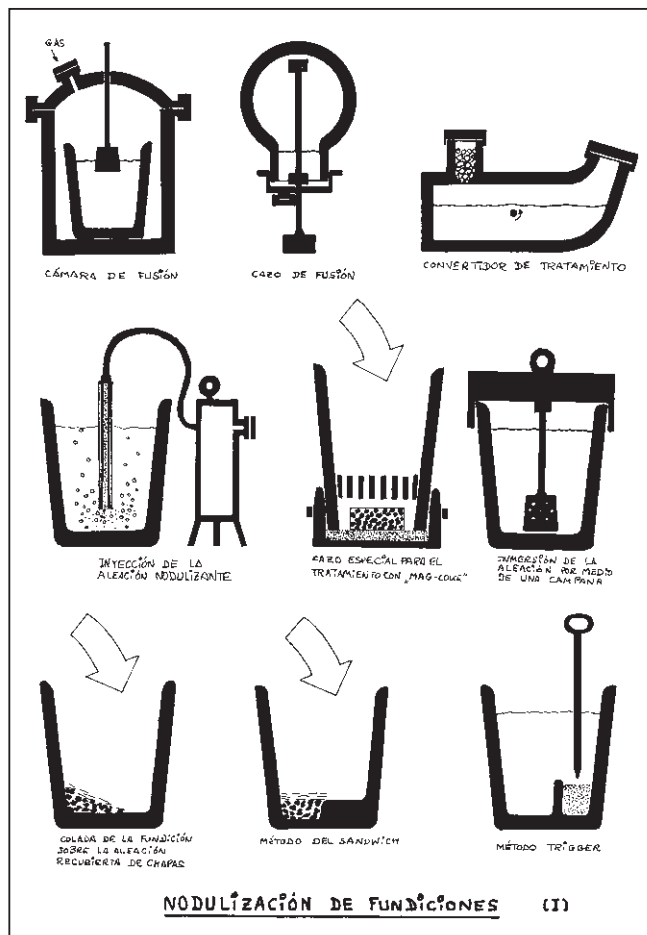


Figura 44.

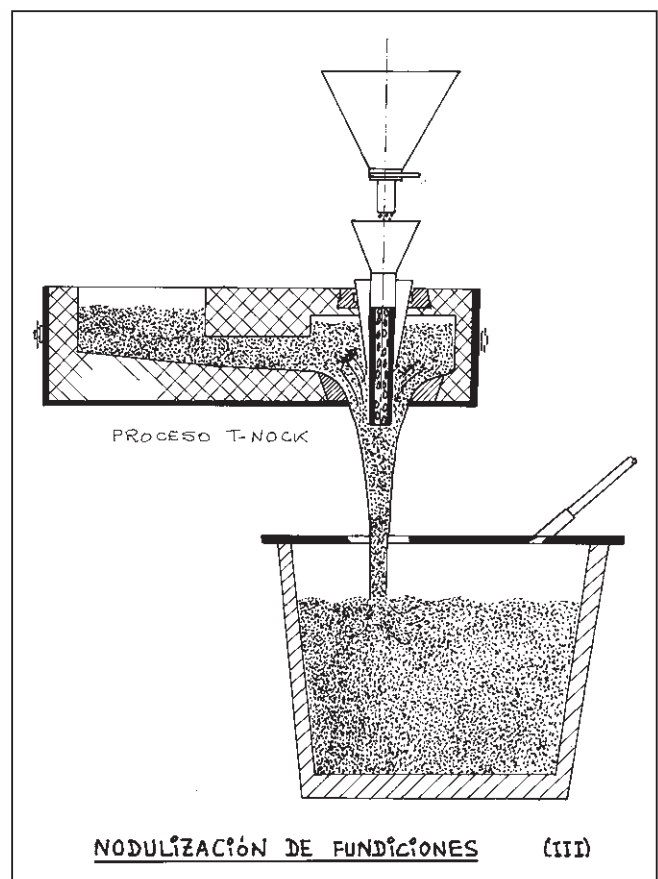


Figura 46.



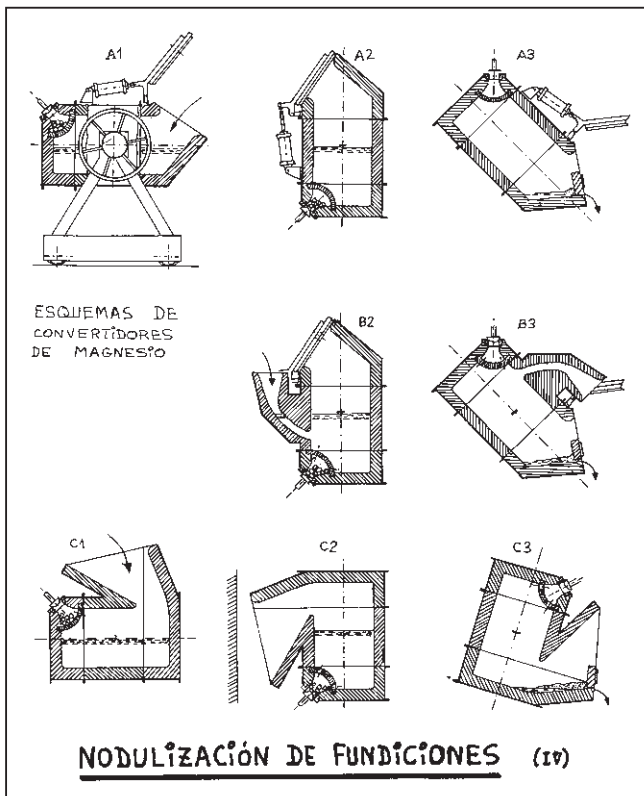


Figura 47.

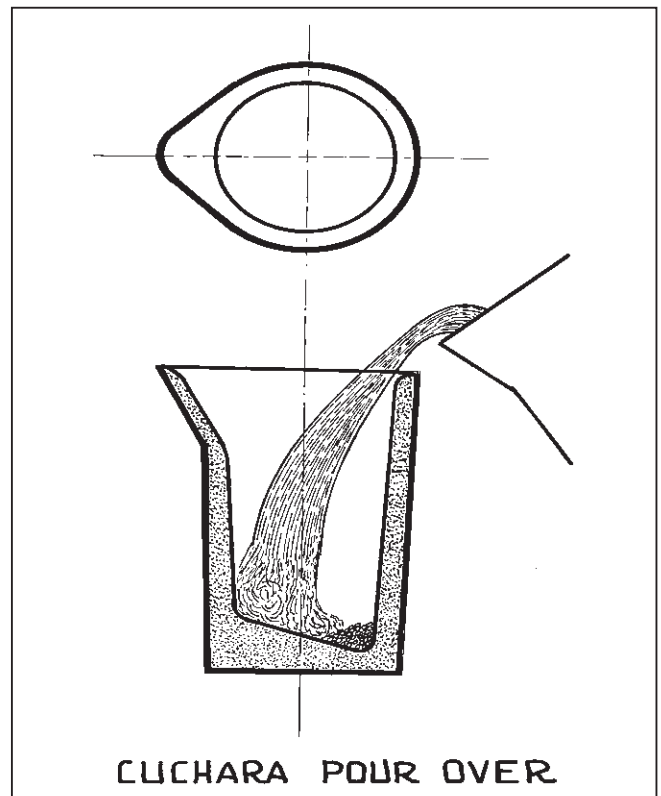


Figura 48.

COMPARACIÓN DE ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS CONVENCIONALES DE NODULIZACIÓN						
PROCESO	OVERPOURING	SANDWICH	CAMPANA INMERSIÓN	CONVERTIDOR FISHER	INMOLD	FLOTRET
CARACTERÍSTICA						
NODULIZANTE	FeNiMg	FeSiMg	Mg PURO	Mg PURO	FeSiMg	FeSiMg
CONTENIDO DE MAGNESIO, %	4-20	3-10	100	100	3	3-5
AZUFRE, %	<0.060	<0.040	<0.080	<0.150	<0.010	<0.040
EFECCIÓN NEGATIVO DEL AIRE	MEDIO / ALTO	MEDIO / ALTO	BAJO / MEDIO	ALTO	NULO	MEDIO / ALTO
EFICIENCIA DE LA INOCULACIÓN	BAJA	IRREGULAR	BAJA / NULA	NULA	ALTA	BAJA
COSTO DE INVERSIÓN	NULO	NULO	BAJO	ALTO	NULO	BAJO
FACILIDAD DE IMPLANTACIÓN	SENCILLA	SENCILLA	ESTACIÓN Y CAMPANAS	CONVERTIDOR Y EQUIPO	SÓLO PARA SERIE LARGA	PREPARACIÓN DE CÁMARA
CANTIDAD DE TRATAMIENTOS	ILIMITADA	ILIMITADA	ILIMITADA	<5 t	UN MOLDE CADA VEZ	ILIMITADA
DESVENTAJAS OPERATIVAS	INTERFERENCIA DE LA ESCORIA FALTA DE REPRODUCIBILIDAD	INTERFERENCIA DE LA ESCORIA FALTA DE REPRODUCIBILIDAD	INTERFERENCIA DE LA ESCORIA CAMPANA DE INMERSIÓN	CONTINUIDAD DE LA OPERACIÓN	DISTRIBUCIÓN HETEROGÉNEA DEL MAGNESIO	INTERFERENCIA DE LA ESCORIA

Tabla 4.

que puede emplearse es colar el hierro base sobre una aleación níquel-magnesio que tiene mayor densidad que la fundición líquida. Éste fue el primer método comercial de producción de nodular y para ello se empleó una aleación master de 85% de níquel y 15% de magnesio. Posteriormente se desarrollaron las aleaciones de las series Incomag y Noduloy.

a) Proceso clásico (adición directa):

La Figura 48 representa esquemáticamente la cuchara para el proceso Pour Over. Las recuperaciones más ele-

vadas en este proceso se obtienen cuando la altura de la cuchara de tratamiento es triple que su diámetro. El sistema procede como sigue:

1. Se coloca la aleación nodulizante en una esquina del fondo de una cuchara que se ha calentado previamente a más de 1.000 °C.
2. Se cuela un peso predeterminado de hierro base sobre la aleación tan rápidamente como se pueda. Una vez terminada la reacción desescoriar rápidamente.
3. Inocular con una aleación basada en ferrosilicio. El inoculante se añade en el

chorro de caldo en el momento en que se hace el trasvase de la cuchara de tratamiento a la de colada. En algunos casos la inoculación se efectúa (Figura 49) cuando cae el último tercio del hierro base a la cuchara de tratamiento.

La Figura 50 representa gráficamente la influencia de la temperatura del hierro base sobre el rendimiento de recuperación de magnesio.

(Continuará)

## PRÁCTICA DE FUNDICIÓN: FABRICACIÓN DE FUNDICIÓN NODULAR (Parte 6)

José Luis Enríquez  
Enrique Tremps



Figura 49.

b. Sobre-tratamiento / dilución:

La Figura 51 describe esquemáticamente esta alternativa de proceso, desarrollada en la fundición Gebrüder Sulzer, de Suiza. El tratamiento inicial con magnesio se hace a baja temperatura, pero la adición posterior de un caldo de dilución muy caliente hace que la temperatura final después del proceso sea muy alta. Esto implica, por supuesto, que el caldo de dilución ha de proceder de un horno eléctrico. Hay que ajustar la temperatura inicial

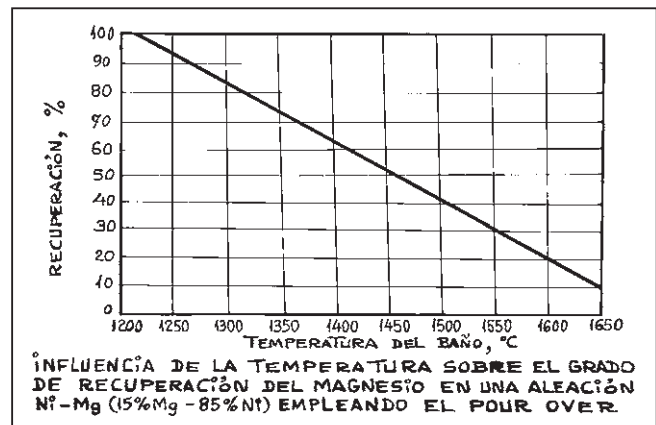


Figura 50.

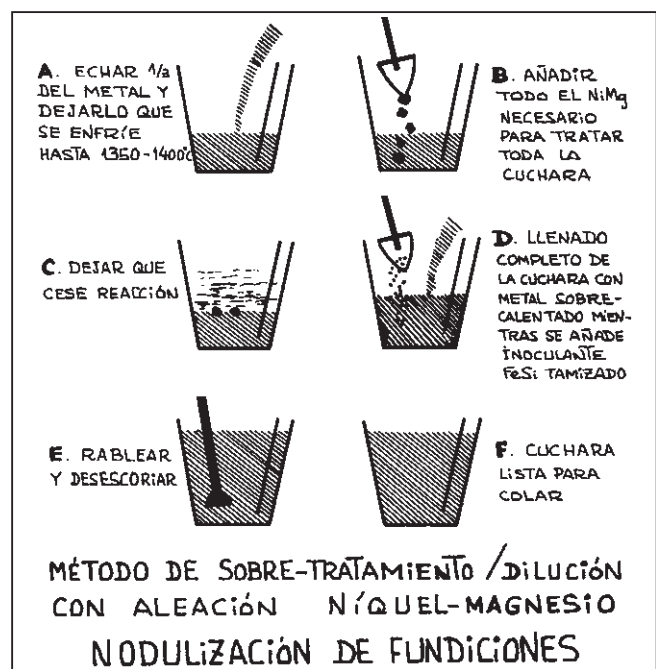


Figura 51.

del hierro base en el horno eléctrico a unos 1.500 °C, a la cual un tercio de la cantidad total requerida se bascula a la cuchara y se la deja enfriar hasta unos 1.350 °C. Mientras, continúa el calentamiento del metal restante (que se usará para diluir el ya tratado) en el horno.

Cuando la temperatura en cuchara ha descendido hasta el nivel deseado se añade la cantidad calculada de NiMg para tratamiento de la cuchara completa. Terminada la reacción, el metal sobre-tratado ha de agitarse para que no queden trozos de aleación sin reaccionar. Después se bascula el horno y se descargan los dos tercios que restan para completar lo previsto para la cuchara. El caldo de dilución debe estar sobrecalentado a unos 1.530 - 1.550 °C.

El FeSi de inoculación puede adicionarse al chorro de metal de dilución cuando cae a la cuchara. Si el peso total no excede las dos toneladas la inoculación con silicio puede retrasarse hasta que se haya llenado la cuchara y se haya desescoriado; de esta forma el FeSi puede añadirse sobre baño desnudo, agitando bien después.

Es obvio que la cantidad de NiMg nodulizante dependerá de los contenidos de azufre del hierro base. Si éste procede de fusión eléctrica los contenidos de azufre serán bajos (0,02%), y dadas las bajas temperaturas del proceso se obtiene un buen rendimiento de recuperación de magnesio, del orden del 50 – 60%. La proporción necesaria de aleación es de un 0,9 – 1,0% sobre peso de metal tratado y la fundición nodular resultante, después de nodulizada e inoculada, se encuentra lista para colar y a una temperatura de unos 1.450 °C.

La gráfica de la Figura 52 muestra la recuperación de magnesio y temperatura final del caldo a las que se llega en este proceso. En ciertas condiciones prácticas, con mayores cantidades de tratamiento, tanto la recuperación de magnesio como la temperatura final será mayores que las sugeridas por este gráfico.

#### 6.2.2. Proceso Sandwich

Desarrollado por la Ford Motor Company, se representa esquemáticamente en la Figura 53. Ha sido el método

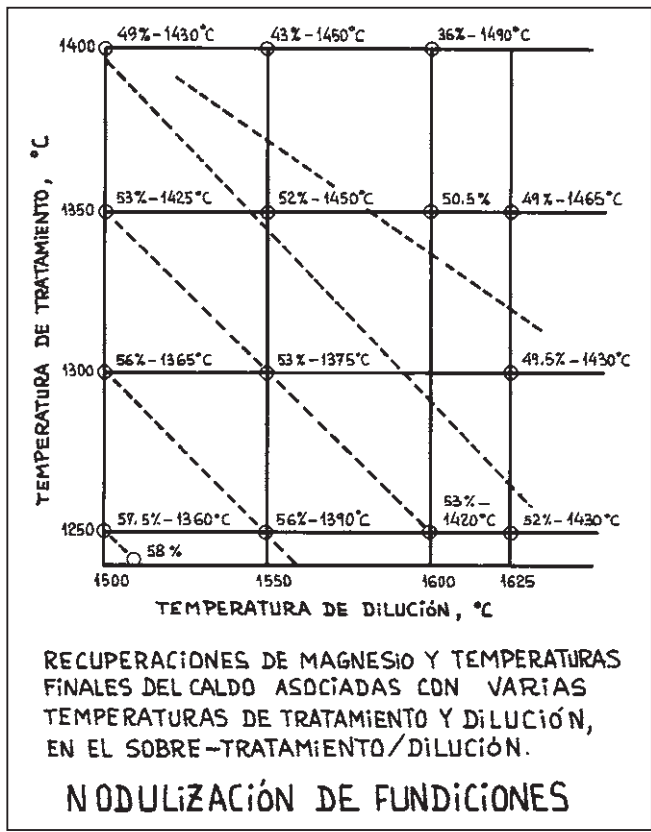


Figura 52.

más usado para producir grandes cantidades de fundición nodular para piezas de automoción, y es un proceso que ha sufrido múltiples variaciones (Figuras 54 y 55) cu-

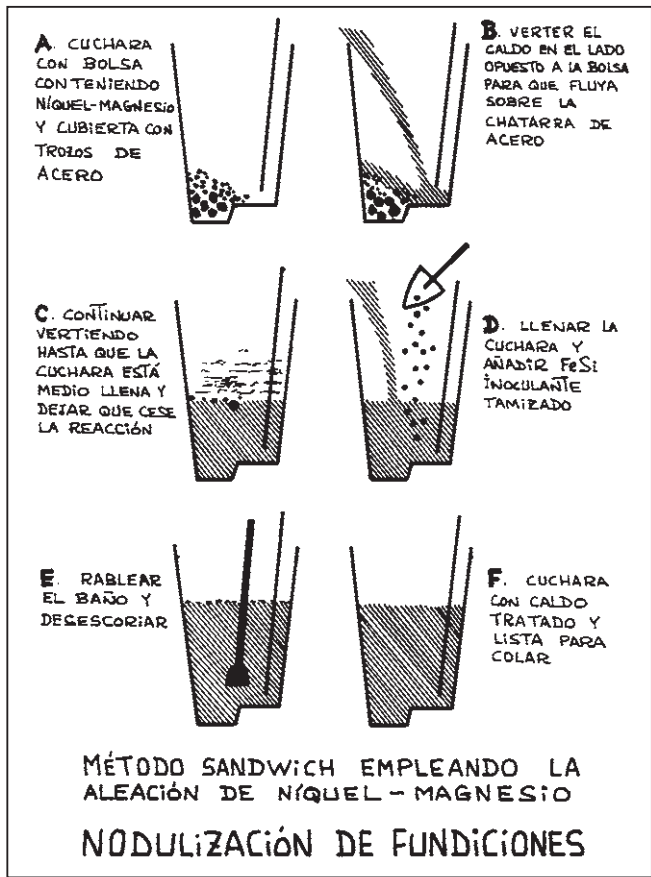


Figura 53.

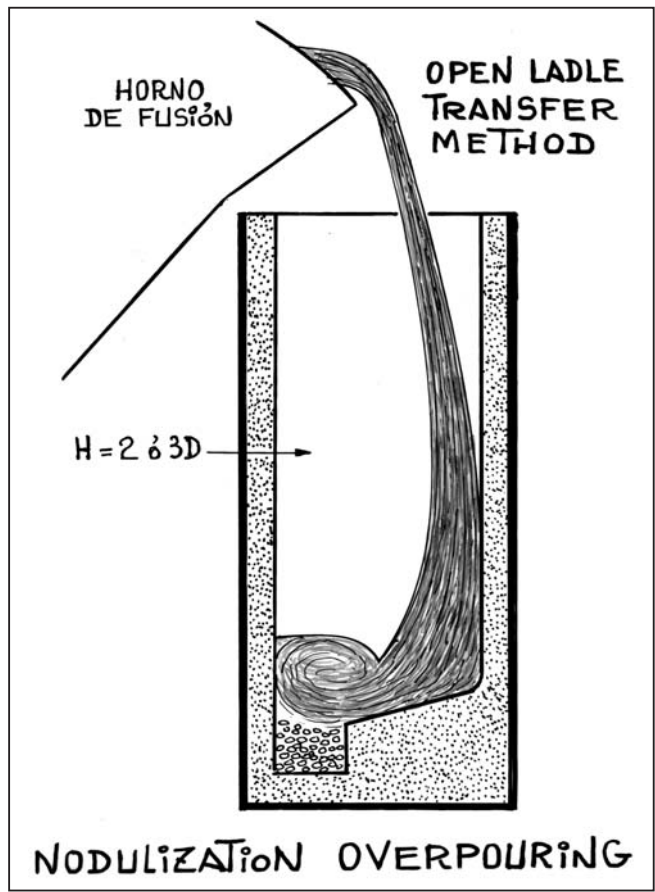


Figura 54.

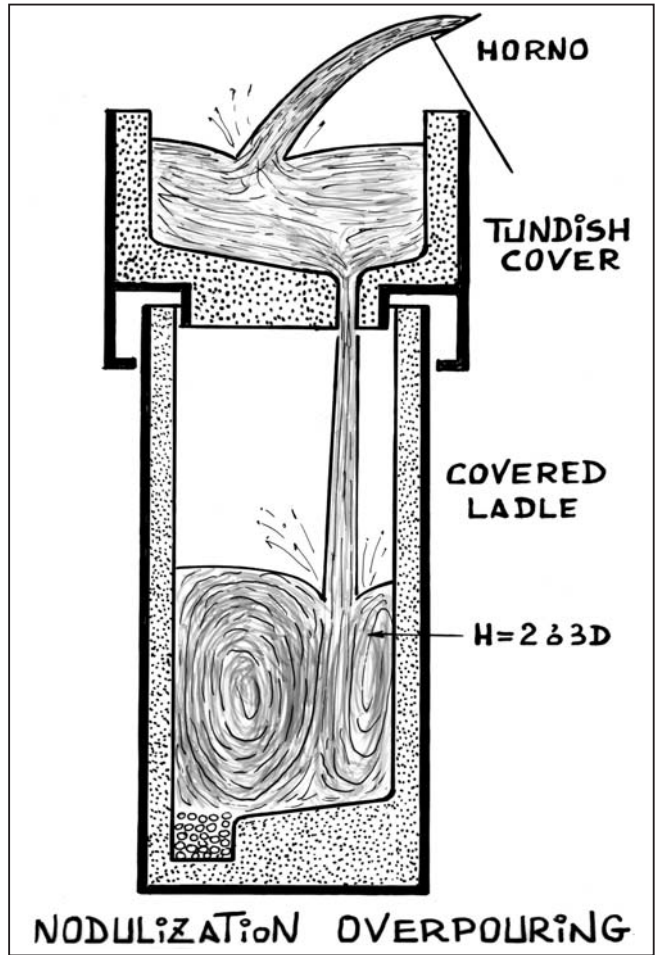


Figura 55.



Los principios esenciales siguen siendo los mismos. Como puede verse, la aleación nodulizante de magnesio se coloca en un alvéolo practicado en el fondo de la cuchara, y se cubre con una capa protectora de chapas o punzonaduras de acero, escamas de fundición nodular o viruta, cuyo objeto es retrasar el contacto entre el metal líquido y el nodulizante. El peso de esta cubierta no es fijo, siendo más o menos un 2% del metal tratado o igual al peso de aleación nodulizante.

Si la cuchara se emplea de continuo y, por consiguiente, está muy caliente, la protección se hace con carburo cálcico que, por el calor de la cuchara, se sinteriza y forma un caramelo que protege la aleación el tiempo necesario para el llenado de la cuchara. Es el proceso Trigger (Meehanite Co.) mostrado en la Figura 56. En algunos casos en los que la cuchara no está lo suficientemente caliente, el carburo se sustituye por arena de cáscara o de silicato- $\text{CO}_2$ . Si la costra protectora no se rompe espontáneamente se pica con una barra gruesa y afilada.

Otra variante, cada vez más utilizada, es el proceso Teapot. Se trata de una cuchara de tetera en la que el alvéolo para el magnesio se encuentra situado diametralmente opuesto a la tetera. Mediante un sistema especial, el caldo entra por la tetera, con lo que se mantiene libre de cualesquiera espumas o residuos de tratamiento.

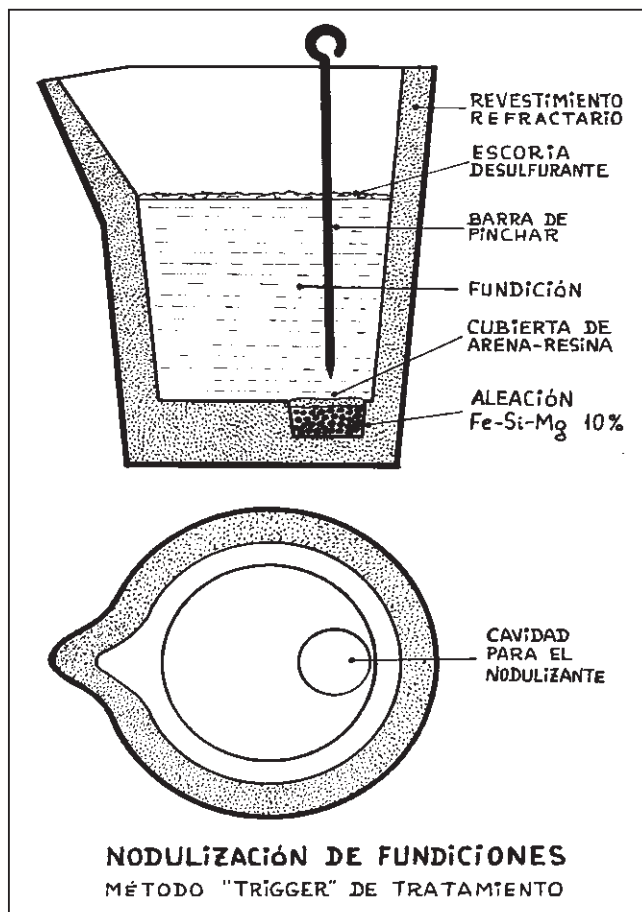


Figura 56.

Una práctica favorable es proteger la aleación envolviéndola en una malla de alambre fino (nunca galvanizado) o papel de aluminio, sistemas que facilitan la caída de toda la aleación en el alvéolo.

La experiencia con el Sandwich, también llamado método de Payne, muestra que aporta mejores recuperaciones de magnesio que el Pour Over antes descrito. En efecto, la mayor parte de la reacción se confina al fondo de la cuchara y tiene lugar a velocidad y temperatura reducidas, probablemente porque la temperatura del caldo junto al alvéolo disminuye al ser retirado de ella el calor necesario para fundir la barrera protectora de acero o carburo. A mayor abundamiento, el hierro sobre-tratado del fondo de la cuchara es diluido después por el caldo más caliente situado sobre él.

Por otra parte, como la reacción se da por debajo de la superficie del metal fundido, hay menos probabilidad de que se produzcan mermas de magnesio por oxidación. Como resultado, se tiene mayor cantidad de magnesio efectivo por unidad de aleación adicionada y menores pérdidas de temperatura. El tiempo de llenado de la cuchara y la granulometría del nodulizante no influyen extremadamente pero guardan relación. Cuanto menor es el tamaño de grano más rápida (y violenta) es la reacción.

**Cuchara de tratamiento:**

Las dimensiones interiores de la cuchara son tales que su altura debe ser 1,5 veces, como mínimo, mayor que su diámetro. La Figura 57 describe la cuchara, cuyas dimensiones se detallan en la Tabla 5. Sobre la base del revestimiento se construye un escalón con ladrillo refractario o material apisonado. Éste deberá ocupar aproximadamente la mitad del área de la base y será de espesor suficiente para formar una bolsa o alvéolo que contenga la cantidad de aleación nodulizante (Fe Si Mg) prevista, cuya densidad aparente es de unos 2 kg/l.

Cuando se utiliza tetera el escalón debe hacerse en la base de la canaleta, con lo que la "bolsa" se separa de ésta reduciéndose al mínimo el riesgo de que pequeños trozos de acero o aleación sean arrastrados al interior de la canaleta durante el llenado, dando lugar a un posible bloqueo de la misma. Por otra parte, como el objetivo es volcar sobre el escalón y no sobre la bolsa, se asegura tener la canaleta siempre alejada de la piqueta del horno durante el llenado de la cuchara.

No se han dado dimensiones para los revestimientos de las cucharas, ya que aquéllas están influidas en gran parte por la práctica normal de tratamiento. Cuando sólo se realizan tratamientos ocasionales o intermitentes, rara vez se consideran los problemas de los materiales refractarios de la cuchara de colada. Como revestimientos normales ácidos frecuentemente se utiliza arcilla refractaria o

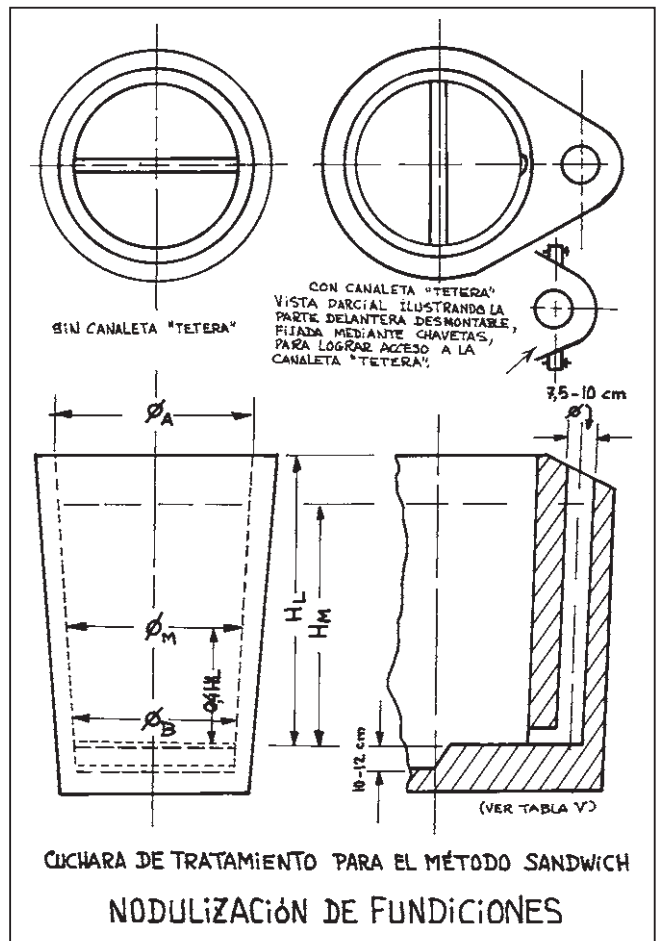


Figura 57.

CUCHARA DE TRATAMIENTO PARA EL MÉTODO SANDWICH			
DIMENSIONES INTERIORES			
PESO DE FUNDICIÓN Kg	DIÁMETRO $\phi_M$ A $0,4 H_L$ , mm	ALTURA APROX. DE FUNDICIÓN $H_M$ , mm	ALTURA TOTAL DE LA CUCHARA $H_L$ , mm
150	250 - 260	350 - 390	500
250	300 - 320	400 - 450	550
350	350 - 360	450 - 480	600
500	390 - 400	520 - 550	700
600	410 - 420	570 - 600	750
750	440 - 450	620 - 670	800
1000	490 - 500	680 - 720	850
1250	540 - 550	710 - 740	900
1500	570 - 580	770 - 800	1000
2000	610 - 620	870 - 920	1100

**NOTA:** SE HA TENIDO EN CUENTA EL EFECTO DE LA "BOLSA" Y DE LA "TETERA". SI ESTA ÚLTIMA NO SE UTILIZA,  $H_M$  ES APROXIMADAMENTE EL VALOR MEDIO DE LA GAMA CITADA CUANDO  $\phi_M$  ES EL VALOR MAYOR.

$\phi_A = \phi_M + 20$  mm       $\phi_B = \phi_M - 10$  mm  
 $a = 40$  mm                       $a = 20$  mm

Tabla 5.

“pisé” con espesores de 2 - 3 cm en los costados y 4 - 6 cm. en el fondo. La canaleta “tetera” con frecuencia se convierte en un puente poco profundo que atraviesa el borde de la cuchara. Para tratamientos frecuentes y regulares, como en la producción continua, prestar especial atención a la calidad del material refractario de la cuchara pasa a ser característica importante en una buena técnica. La frecuente (pero muy deplorable) práctica de utilizar la cuchara de tratamiento para posterior inoculación y vertido, hace que esto sea imperativo si quieren evitarse inacabables problemas de “espuma”.

Los productos finales de las reacciones de tratamiento con Mg tienden a ser básicos, y los revestimientos ácidos tienden a atacarlos. Además, las reacciones de desulfuración (sea mediante el empleo de Mg o el de otro agente más económico) no son satisfactoriamente eficaces frente a revestimientos ácidos. Se ha utilizado arcilla refractaria grafitada o revestimientos de carbón, pero tienden a oxidarse y dan también mayores pérdidas de temperatura. Los revestimientos básicos, como dolomía estabilizada o magnesita colocada con pisón neumático, son factibles pero costosos, y deberá controlarse cuidadosamente su respuesta a los cambios de temperatura, especialmente entre períodos de utilización.

Los revestimientos neutros de cromo-magnesita o carburo de silicio, o algunos de los óxidos fundidos puros, son superiores pero de aplicación más limitada. Un material de muy buenas propiedades es la alúmina “en burbujas”, constituida por esferas huecas de un 98% de  $Al_2O_3$  fundidas en horno eléctrico. Éstas tienen un tamaño no superior a 2,5 mm, y están aglomeradas mediante cemento de aluminato cálcico de alta pureza (“Secar”). Es un excelente material refractario y resiste al ataque de los productos de reacción. Proporciona una

superficie de revestimiento duradera y es un material aislante eficaz. Las pérdidas de temperatura se reducen aproximadamente en un 50%, con las consiguientes ventajas prácticas. Para tales revestimientos “fundidos” o apisonados se precisa un molde, con una separación de 50 a 60 mm., como mínimo, entre dicho molde y el apisonado. La porción comprendida entre la tetera y la cuchara no deberá ser inferior a 70 mm.

Cálculo de adición nodulizante:

Pudiera parecer que en una aleación muy pura de hierro, carbono y silicio totalmente exenta de azufre sería suficiente con un átomo de Mg por cada 5.000 átomos de Fe (dicho de otra forma, menos de 0,01% de Mg en peso) para proporcionar grafito nodular. Cuando está presente el azufre, incluso en muy bajas cantidades, al Mg residual precisado para neutralizar el azufre hay que añadir un 0,01 - 0,02% en exceso. Como es sabido, se han obtenido buenas estructuras con porcentajes inferiores de Mg. Hay que tener presente que la determinación rutinaria de contenidos de Mg y S muy bajos es difícil, y los materiales utilizados tienen una marcada influencia sobre el porcentaje deseado de Mg residual. Cuanto más alta sea la pureza del caldo, menor será la cantidad de Mg requerida, aún partiendo de un contenido alto de azufre antes del tratamiento.

La Tabla 6 expresa las necesidades mínimas de Mg, que pueden verse gráficamente en la Figura 58.

Estas adiciones recomendadas o la proporción de Mg residual deseada se ven modificadas por elevadas temperaturas de tratamiento, mayor espesor de las piezas o por mayor duración de las operaciones posteriores de transvase y colada. La cantidad de aleación que debe

NECESIDADES MÍNIMAS DE MAGNESIO SEGÚN CONTENIDO DE AZUFRE EN EL HIERRO BASE				
% DE S ANTES DEL TRATAMIENTO	% DE Mg EQUIVALENTE A ESE S	% DE MAGNESIO RESIDUAL		
		0,01 % DE EXCESO	0,02 % DE EXCESO	ADICIÓN RECOMENDADA, %
0,060	0,047	0,057	0,067	0,060 - 0,070
0,050	0,038	0,048	0,058	0,050 - 0,060
0,040	0,030	0,040	0,050	0,040 - 0,050
0,030	0,023	0,033	0,043	0,035 - 0,045
0,020	0,015	0,025	0,035	0,030 - 0,040
0,010	0,007	0,017	0,027	0,025 - 0,030
0,005	0,004	0,014	0,023	0,025 - 0,030

Tabla 6.

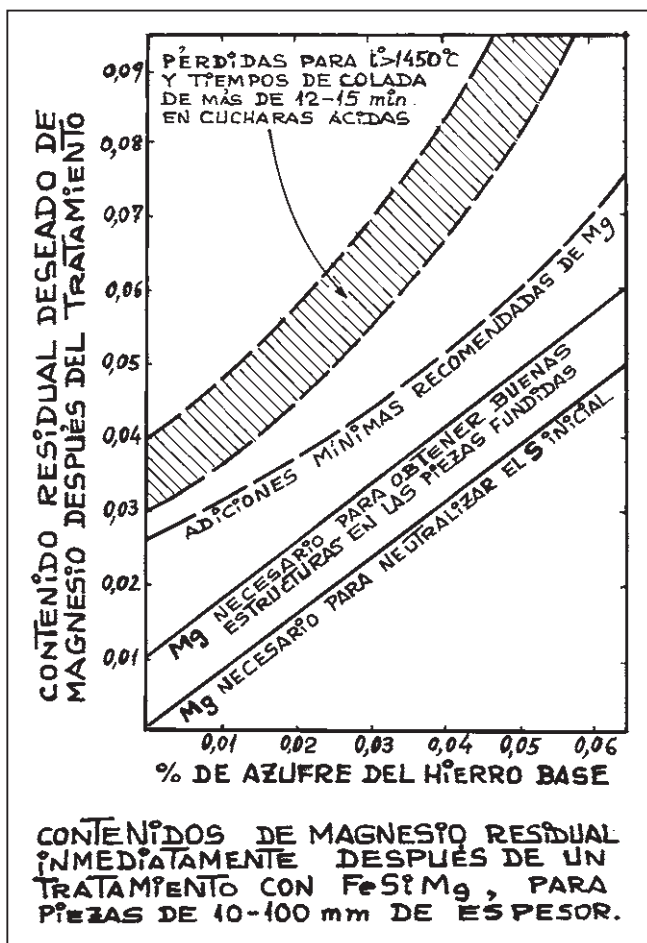


Figura 58.

añadirse para obtener la conveniente adición de magnesio dependerá del rendimiento de recuperación de Mg obtenido en la práctica. Una vez fijada la recuperación de Mg, pueden variarse los otros factores de trabajo para regular el proceso. Hay que insistir en que los factores de trabajo y la técnica seguida en la práctica son aquí vitales. No se trata sólo de saber qué está ocurriendo, sino también y, principalmente, la forma en que se está desarrollando el proceso.

La influencia del tamaño o espesor de las piezas a fundir sobre la cantidad de Mg requerida sólo debe tenerse en

cuenta en el caso de dimensiones extremas. En los intervalos comprendidos entre 8 - 10 mm. y 150 - 160 mm. y entre 1 kg. y 500 - 600 kg. pueden aplicarse las adiciones anteriormente recomendadas. Si los materiales que constituyen la carga son de alta pureza es suficiente una adición de 0,03 - 0,04% de Mg para secciones de 120 - 200 mm. y pesos de hasta 3 t, pero se considera normalmente que es necesaria una adición de 0,05 - 0,06%. En el otro extremo, para espesores de 3 - 6 mm. y pesos inferiores a 1 - 2 kg. es necesario evitar un Mg residual demasiado alto y puede considerarse como margen aceptable de trabajo un 0,02 - 0,04% para minimizar la formación de carburos.

La adición se controla por el contenido de azufre y la temperatura del hierro base. El rendimiento del proceso se ve afectado por la técnica utilizada, y esto se toma en cuenta en el cálculo:

$$W = \frac{0,75 S + Mg_{RES}}{Mg_{REC} \times Mg_A} \times 10.000$$

En donde:

W es la adición expresada como kg Fe Si Mg / 100 kg metal.

S es el porcentaje de azufre en la fundición base.

Mg<sub>RES</sub> es el porcentaje de Mg residual deseado o previsto.

Mg<sub>REC</sub> es el rendimiento o recuperación de magnesio, expresado en%.

(Para contenidos muy bajos de azufre puede despreciarse el factor "+ 0,75" que precede a "S").

Mg<sub>A</sub> es el porcentaje de Mg en la aleación nodulizante.

La Tabla 7 expresa los consumos de nodulizante Fe Si Mg en proceso Sandwich una vez definidos los contenidos de magnesio residual y los porcentajes de recuperación. Puede apreciarse que con aleación de 5% de magnesio las recuperaciones son apreciablemente mejores. Por otra parte, la reacción es menos violenta y, además, pueden tratarse pesos pequeños de caldo. Al igual que

CONSUMO (Kg) DE FeSiMg POR CADA 100 Kg DE HIERRO BASE EN EL PROCESO SANDWICH													
Mg EN EL FeSiMg	10 %				5 %								
	0,050 %				0,050 %				0,035 %				
Mg RESIDUAL	0,01 0,03 0,05 0,07				0,01 0,03 0,05 0,07				0,01 0,03 0,05 0,07				
S INICIAL %													
Mg % RECUPERADO	CONSUMO, Kg				Mg % RECUPERADO	CONSUMO, Kg				CONSUMO, Kg			
25	2,3	2,9	3,5	4,1	50	2,3	2,9	3,5	4,1	1,7	2,3	2,9	3,5
30	1,9	2,4	2,9	3,4	55	2,1	2,6	3,2	3,7	1,6	2,1	2,6	3,2
35	1,7	2,1	2,5	2,9	60	1,9	2,4	2,9	3,4	1,4	1,9	2,4	2,9
40	1,5	1,8	2,2	2,5	65	1,8	2,2	2,7	3,2	1,3	1,8	2,2	2,7
45	1,3	1,6	1,9	2,3	70	1,7	2,1	2,5	2,9	1,2	1,7	2,1	2,5

Tabla 7.



ocurre con la aleación de 10% de Mg, no puede darse un valor específico del grado de recuperación, aunque la experiencia indica valores comprendidos entre 50 y 70%.

En la mayoría de los casos en que se ha sustituido el Fe Si Mg de 10% de Mg por el de 5%, las experiencias pueden dividirse en tres grupos. En primer lugar están aquellas en que la sustitución directa, sin modificar los pesos de aleación adicionados ni los pesos de metal tratados, han producido piezas totalmente satisfactorias. En segundo lugar, y en el caso concreto de pequeños pesos de tratamiento (150 - 200 kg.), algunas fundiciones han visto favorable añadir menores porcentajes de aleación que cuando utilizaban la de 10% Mg. En tercer lugar, se encuentra el grupo más reducido de fundiciones que han considerado conveniente una superior adición en el caso de Fe Si Mg de 5% Mg, aunque los resultados económicos derivados no compensan los problemas surgidos por el aumento en el contenido final de silicio.

Muchos fundidores saben por experiencia que, para contenidos muy bajos de azufre, más frecuentes en las condiciones normales de trabajo, pueden obtenerse menores contenidos finales de magnesio. Las piezas menores de 100 mm. de espesor o de 100 kg. de peso no presentan problemas para obtener un 0,030% de Mg final con tal de que el contenido de azufre inicial sea inferior a 0,02%. Si se considera este hecho relacionado con la sustitución de la aleación de 10% Mg por la de 5% Mg, este cambio se ha realizado frecuentemente sin alteración en el porcentaje de adición. Sin embargo, cuando la adición de la aleación de 10% de Mg ha sido realizada eficazmente, consiguiendo un nivel bajo de magnesio, normalmente se ha considerado necesario un incremento de un 20% en la adición de la aleación.

El hecho de que la reacción sea menos violenta hace posible el manejo de cucharas más llenas. Así ha ocurrido que sin cambiar el peso de adición de las cucharas empleadas (normalmente de pequeña capacidad, 200 - 300 kg) se han podido colar mayores pesos de caldo consiguiendo recuperaciones inasequibles con la aleación de 10% Mg.

El aumento de silicio es una consecuencia del empleo de ferro-silicio-magnesio. El mayor valor posible es un 45% del peso del Fe Si Mg añadido. Para mantener el contenido final del silicio de las piezas dentro de los límites requeridos hay que regular el contenido de silicio de la fundición base de partida y conseguir la mayor eficacia de la reacción con un mínimo contenido de azufre.

Recuperación del magnesio:

La Tabla 8 sirve de guía para predecir los rendimientos esperados cuando se emplea el método sandwich. El rendimiento obtenido en cualquier fundición dada pre-

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL CALDO Y DEL CONTENIDO DE MAGNESIO DEL FeSiMg SOBRE EL RENDIMIENTO O RECUPERACIÓN EN EL PROCESO SANDWICH.		
INTERVALO DE TEMPERATURA DE TRATAMIENTO (°C)	% DE RENDIMIENTO PARA ALEACIÓN DE 8-10% DE Mg	% DE RENDIMIENTO PARA ALEACIÓN DE 5-6% DE Mg
1350 - 1375	45 - 50	65 - 75
1400 - 1425	35 - 40	57 - 67
1450 - 1475	28 - 33	47 - 57
1500 - 1525	22 - 27	37 - 47
1550 - 1575	17 - 22	27 - 37

Tabla 8.

cisa ser evaluado mediante controles y debe verificarse periódicamente, a fin de asegurar mantenimiento del control y parámetros de trabajo. La Figura 59 expresa gráficamente los valores de la tabla anterior. Finalmente, en la Figura 60 aparecen, de forma aproximada, los valores de magnesio necesarios para obtener grafito esferoidal en función de los contenidos de azufre de la fundición tratada. Hay otros factores que afectan a la recuperación, como son:

- Índice de saturación.
- Pesos de tratamiento.
- Temperatura del caldo.
- Revestimiento de la cuchara.

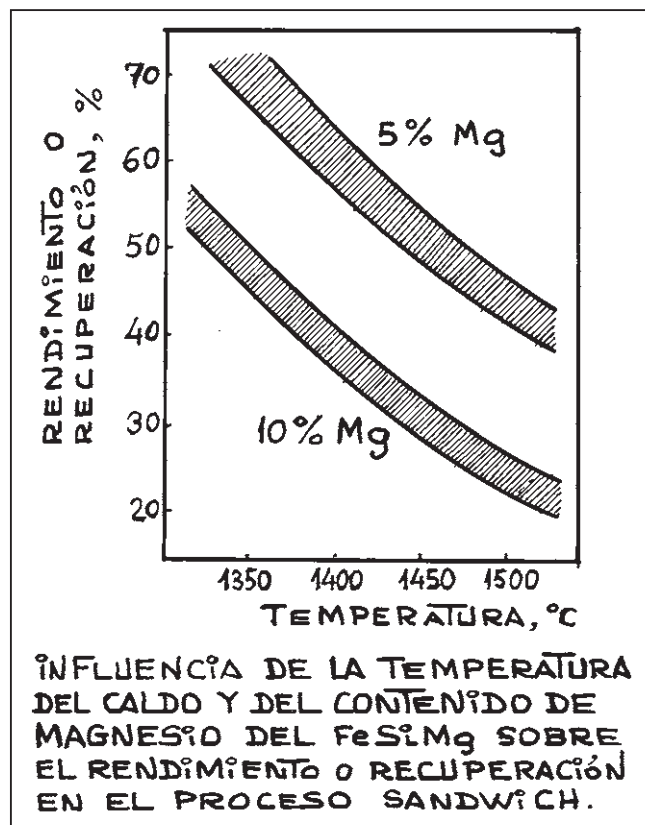


Figura 59.

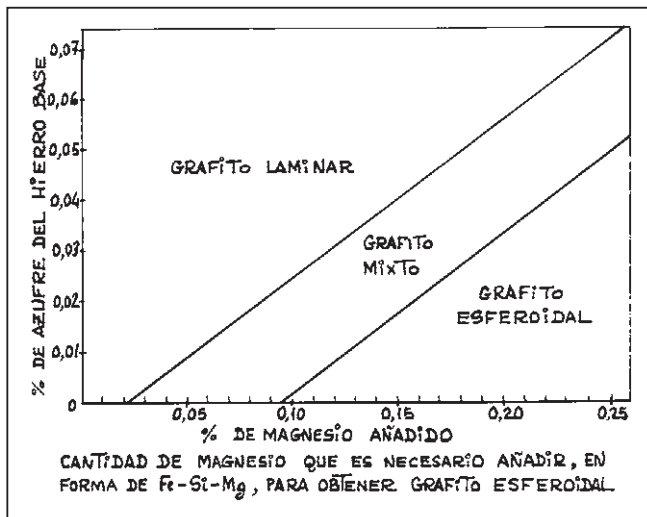


Figura 60.

El carbono equivalente y el carbono equivalente en el liquidus vienen dados, respectivamente, por las fórmulas:

$$CE = CT + \frac{Si + P}{3} \quad \text{y} \quad CEL = CT + \frac{Si}{4} + \frac{P}{2}$$

y el grado o índice de saturación se expresa como

$$SC = \frac{CT}{4,3 - \frac{Si + P}{3}}$$

Pues bien, cuando estas magnitudes aumentan también lo hace el rendimiento de recuperación.

En lo que concierne al peso del metal tratado en la cuchara se ayuda ligeramente a la recuperación, debido a la mayor profundidad del metal en la misma. Las pérdidas de temperatura tienden a disminuir a medida que aumenta el peso de tratamiento, permitiendo que se utilicen temperaturas de tratamiento ligeramente más bajas. Además, los mayores pesos de tratamiento son frecuentemente para piezas fundidas más pesadas, que precisan también de temperaturas de colada más bajas. Todos estos factores resultan en la consecución de mejores recuperaciones.

Al aumentar la temperatura aumentan las velocidades de reacción y de destilación del Mg. Por encima de 1.500 °C esto sucede con una excesiva rapidez y rara vez es aconsejable llevar a cabo tratamientos por encima de esta temperatura. Siguiendo el modo normal de operar se puede tener un caldo a 1.420 – 1.450 °C después del tratamiento con Mg usando Fe Si Mg sin necesidad de superar los 1.500 °C en la piqueta del horno. La necesidad de trabajar a temperaturas altas sólo está justificada por el empleo de cucharas frías, excesivos tiempos de manipulación o por colar piezas

delgadas. Estos inconvenientes se subsanan con cucharas precalentadas convenientemente (con fundición líquida, a ser posible), manipulación correcta y sistemas adecuados de alimentación que aprovechen la fluidez de la fundición esferoidal.

Cuando se han verificado los contenidos de azufre, las temperaturas de tratamiento y los pesos de adición y de caldo, una de las fuentes más frecuentes de resultados erráticos es el material del revestimiento de la cuchara. Frecuentemente se utiliza una arcilla refractaria corriente (silicoaluminoso). Ésta dará resultado satisfactorio si está limpia. Es objeto de ataque por los productos de reacción muy básicos, pero no es capaz de “fijar” los componentes ricos en azufre. Después de unos pocos tratamientos consecutivos, por ejemplo unos 20, el frente de arranque es causa potencial de una recuperación reducida y de una mayor cantidad de escoria. El uso de revestimientos básicos o neutros apisonados obviará esto. Pero si no se adoptan precauciones especiales los revestimientos básicos deben renovarse frecuentemente a causa de la estabilidad del propio refractario a temperaturas ambientes en atmósferas normales.

Pérdidas de magnesio:

El punto de ebullición del Mg puro a presión atmosférica es de 1.100 °C. Sin embargo, en ciertos casos se hace bajar la actividad, se reduce la presión de vapor y la destilación de magnesio procede lentamente. La colada y solidificación de las fundiciones pueden producirse en condiciones de ausencia de agitación en las que la pérdida de Mg a temperaturas de 1.350 °C y por debajo es despreciable. Por encima de 1.350 °C y hasta 1.400 °C, en una cuchara de colada profunda, sin agitar o inclinar la cuchara, los efectos combinados de la destilación y la oxidación de la superficie no dan lugar a muchas dificultades prácticas.

Por encima de 1.400 °C, cuando se utilizan cucharas de colada poco profundas, con tetera o vertido por el borde, en las que el vaciado implica inclinar la cuchara adelante y atrás, descubriendo nuevas superficies de metal al ambiente, la pérdida de magnesio o “desaparición gradual de magnesio” pasa a ser un factor de gran importancia práctica; la velocidad de desaparición gradual de magnesio aumenta rápidamente con la temperatura y con el contenido de magnesio. Estos dos factores, combinados con el tiempo que el metal se mantiene en la cuchara, pueden obligar a duplicar el contenido de Mg residual precisado después del tratamiento, con el fin de asegurar un contenido de Mg suficientemente alto cuando se cuegan las últimas piezas.

(Continuará)

## PRÁCTICA DE FUNDICIÓN: FABRICACIÓN DE FUNDICIÓN NODULAR (Parte 7)

*José Luis Enríquez  
Enrique Tremps*

Un ejemplo de tal efecto oxidante está en colada de tubos centrifugados. El hierro tratado con Mg tiene que fluir como corriente relativamente delgada a lo largo del canal de colada de una longitud algo mayor que la tubería que va a fundirse (5 - 6 m). Aún cuando el espesor relativamente delgado de la pared y el enfriamiento acelerado debido al molde metálico pueden proporcionar resultados eficaces con contenidos de Mg muy bajos (0,015 - 0,025%), el contenido de Mg inmediatamente antes de la colada debe ser de 0,035 - 0,045%. Cuanto más elevado es el contenido de Mg mayor es la velocidad de su desaparición, y cuanto mayor es el contenido de azufre antes del tratamiento más acusados se hacen los problemas de la desaparición gradual de ese Mg.

Los revestimientos básicos o neutros de la cuchara de colada restringen sensiblemente la pérdida de magnesio, debido a la reducción de las reacciones secundarias entre los productos de oxidación de Mg y la sílice. Por otra parte, el manipuleo de los caldos en cucharas de colada por fondo a través de buza (similares a las empleadas en acería) contribuye a disminuir los problemas de decaimiento del magnesio. Como los factores que influyen en las reacciones son simples, bien conocidos y controlables, el control de la disipación gradual del Mg es relativamente sencillo.

Frecuentemente se atribuye a estos factores de decaimiento del Mg la pérdida de calidad de los nódulos de grafito después del tratamiento. Esta idea parece ser errónea, y los problemas citados serían debidos en realidad a desvanecimiento de la acción postinoculadora del ferrosilicio.

Inoculación después del tratamiento con magnesio:

El papel de la inoculación siguiente al tratamiento con Mg en la obtención de propiedades mejores y más con-

sistentes es vital. La aleación de inoculación es casi siempre ferrosilicio con un 75 - 80 o un 85 - 90% de silicio. La presencia de Al y Ca es importante para la eficacia del proceso, aunque se ha dicho que otros elementos, como el estroncio, favorecen una casi completa eliminación de carburos. La adición absoluta mínima para obtener la mejor forma del grafito es de 0,3% de Si, y la más usual es de 0,5% de Si, es decir, 0,6 - 0,7% de FeSi de 75 - 80%. Cuando el contenido final de silicio lo permite, pueden efectuarse adiciones de hasta el 1,0% de FeSi (lo que equivale a añadir 0,75 - 0,80% de silicio puro). Existe cierta prevención contra el uso de aleaciones de mayor contenido de Al, o de más altas adiciones, a causa del riesgo de formación de picaduras.

Las características más importantes de esta "postinoculación" son el tiempo y lugar de la adición. En algunos casos se añade simultáneamente a la aleación de Mg en la cuchara de tratamiento, echándose sobre la superficie del baño después del desescoriado. De hacerlo así no es fácil asegurar una completa difusión a través de todo el caldo, y cierta pérdida de inoculación puede atribuirse a esto en vez de a la desaparición real del efecto inoculante. Cuando no es posible realizar la inoculación en distinta cuchara es más efectivo añadir el FeSi al caldo limpio en la cuchara de tratamiento en, al menos, dos partes: la mitad de la adición deberá echarse inmediatamente después del tratamiento o antes de la colada y el resto cuando al colar quede media cuchara por vaciar.

Cuando se utiliza una cuchara independiente, práctica a seguir siempre que se pueda, la adición deberá hacerse durante la transferencia del caldo desde la cuchara de tratamiento. Se han hecho varios intentos para mejorar esto como añadir parte del FeSi en la cuchara de tratamiento y parte en la cuchara de colada, o adicionar al-

gunos finos en el sistema de bebedero del molde (“inoculación en molde”). También utilizando una varilla maciza de FeSi dispuesta de forma que el flujo de caldo sobre el borde de la cuchara lave la punta de la barra (inoculación instantánea en cuchara). Ninguno de estos dos métodos ha de considerarse como un sustituto perfecto de la adecuada inoculación en cuchara, sino más bien como técnicas auxiliares para secciones (o perfiles) más delgadas en donde la colada está todavía realizándose, por ejemplo, más de 5 minutos después de haberse completado el tratamiento con magnesio. También en líneas automáticas de moldeo y colada.

Es importante conseguir un mezclado completo del inoculante en el baño y puede resultar más conveniente hacer esto cuando se vierte del horno a la cuchara o de la cuchara de tratamiento a la cuchara de colada. El inoculante puede añadirse al último tercio del caldo que se vierte, interrumpiendo la basculación cuando se han echado dos tercios de la cantidad total de caldo y se ha añadido el total de la aleación de Mg. Una vez que ha cesado la reacción del Mg, se completa la basculación, añadiendo el inoculante sobre el chorro de metal en la piqueta del horno. En tales casos, es ventajoso retirar la escoria o espuma de los productos de reacción antes de añadir el FeSi. Como ya se dijo al tratar la técnica de sobretratamiento/dilución, puede añadirse el inoculante durante la adición posterior del caldo de dilución o puede añadirse al caldo de dilución en el propio horno (siempre que éste se vacíe completamente) para dar la cantidad total tratada.

La inoculación más efectiva es la que se hace lo más tarde posible, e inmediatamente antes de colar los moldes. Por ello, es, a veces, favorable efectuar parte de la adición inoculante, que representa un aumento del 0,2% en el contenido de silicio, inmediatamente antes de colar. Este sistema es particularmente valioso cuando el caldo tratado y parcialmente inoculado ha de transportarse una larga distancia antes de colar y el metal ha de transferirse desde la cuchara de transporte a las cucharas de colada.

Hay un sistema moderno de post-inoculación que reduce o elimina la formación de carburos en la estructura en bruto de colada. Este sistema se conoce como “inoculación en el molde”. Se lleva a cabo colocando en la base del bebedero una pequeña cantidad (generalmente, de sólo unos gramos) de FeSi en polvo (tamizado por criba de 0,6 mm de abertura), de forma que el primer metal que entra lo introduce en el molde. Algunos productores de fundición nodular al níquel emplean grafito en polvo para inoculación en el molde. Se dice que ambos procedimientos ayudan a eliminar las pequeñas proporciones de carburos libres que aparecen en la estructura de piezas de sección delgada. Este proceso de inoculación en el molde ha sido estudiado y desarro-

llado comercialmente por algunas firmas, de las cuales se puede obtener información adecuada.

Aunque es ventajoso efectuar fuertes adiciones de inoculante, es deseable que el contenido final de Si en el hierro tratado no supere el 2,5%, ya que contenidos mayores de este elemento tienen una influencia fragilizante debido al aumento de la temperatura de transición de impacto.

Espuma:

Los productos de la reacción entre el Mg y el Si, además de cualquier producto subsiguiente de la oxidación o reacción entre éstos y los revestimientos de la cuchara, así como los residuos procedentes de tratamientos anteriores, son las bases para la formación de espuma. Con composiciones sumamente hipereutécticas, de carbono equivalente mayor de 4,5 y grado de saturación por encima de 1,08, la separación del grafito primario durante el enfriamiento aumentará esta espuma. Altos valores iniciales del Mg residual y mantenimiento del metal en una cuchara con fuerte inclinación aumentarán la espuma formada. Incluso con cucharas dotadas de canleta de tetera resulta sumamente difícil impedir que tal espuma sea vaciada con el metal. El empleo de fundentes de cobertura basados en sales de magnesio y fluoruro cálcico ayudará un poco a retardar las reacciones indeseables pero solamente a expensas de añadir mayores inclusiones no metálicas en potencia. El espato flúor mejora la recuperación de Mg.

Jamás se resaltarán suficientemente la importancia de la limpieza de las cucharas; particularmente porque la idea general de que un revestimiento limpio resulta esencial para aplicaciones normales de fundición se refuerza cuando se efectúa cierto número de tratamientos consecutivos de Mg. Condiciones básicas para reducir el riesgo de formación de espuma son, por citar las más importantes:

- Limpieza del revestimiento de la cuchara.
- Bajo contenido inicial de S antes del tratamiento (preferiblemente menor de 0,02%).
- Adición nodulizante de Mg lo más baja posible compatible con el contenido residual al final de la colada de moldes.
- Mínima temperatura compatible con un satisfactorio llenado de las piezas.
- Buen diseño de bebederos para aprovechar la fluidez del nodular en lugar de sobrecalentar excesivamente el caldo.

La adopción de material neutro para revestimiento puede ser de gran ayuda para reducir al mínimo los problemas de espuma y los de desaparición gradual de Mg. La utilización de la cuchara de buza, aunque no resulta muy ortodoxa en los trabajos normales de fundición de



hierro (aún cuando la fundición esté estrechamente asociada con una fundición de acero), puede aumentar esta ventaja hasta el extremo de hacer desaparecer el riesgo de espuma y desaparición gradual del magnesio.

Para las cucharas de colada o transporte, será siempre preferible la utilización de cucharas independientes para tratamiento y para colada, siendo preferiblemente adecuada la cuchara de colada con descarga por el fondo, con la buza cerrada mediante un cierre accionado por una barra metálica recubierta por refractarios y con una palanca exterior de mando. Este sistema de barra no es muy deseable para tratamiento pero la otra alternativa, es decir, el dispositivo de descarga por el fondo tipo corredera o de revólver puede utilizarse en forma eficaz para las cucharas de tratamiento y colada. Este dispositivo utiliza una válvula de corredera construida con refractarios de precisión y gran resistencia, abriéndose y cerrándose la válvula mediante un volante en el exterior de la cuchara, sin que haya ninguna obstrucción o estructura dentro del metal que soporta la región de la cuchara.

Como cualquiera de los tipos de cuchara de descarga por el fondo, hay un punto muy sencillo, pero importante, a vigilar con el fin de asegurar la frecuencia del uso repetido sin cambiar el cierre o válvula. Es conveniente asegurarse de que, por lo menos, 25 - 30 mm de caldo queden en el fondo de la cuchara cuando se efectúe la colada del último molde, antes de volver a llenar. Hoy día se recurre, en fundiciones mecanizadas, al empleo de unidades automáticas de colada, como es el caso del Press-Pour ABB y otros similares.

#### Pruebas de control antes de la colada:

Son indispensables pruebas rápidas sobre el terreno para verificar la eficacia del tratamiento. Incluso antes del tratamiento, el establecimiento del valor del carbono equivalente CE mediante la técnica de la curva de enfriamiento (Leeds-Northrup, Electronite, etc.) y del silicio mediante equipo termoelectrónico (Siltrak) pueden ayudar decisivamente en el control. El método más frecuentemente utilizado es el de micro-examen con baja energía de muestras normalizadas (semi-preparadas) inmediatamente después del tratamiento con Mg. Las muestras pueden cortarse en barras de 15 mm, en perfiles cuadrados de 12 mm o en probetas de ensayo como las que se ilustran en la Figura 61. Otra modificación a la probeta de ensayo es un saliente quitable de 10 mm de diámetro por 12 mm de altura.

Las muestras se cuelan generalmente en arena aglomerada (arena de machos) y se desmoldean tan pronto como han solidificado. El enfriado rápido con agua se demora hasta que la temperatura ha quedado por debajo de unos 850 °C. Cuando el equipo de preparación está a cierta distancia de la fundición, el molde de arena con la muestra fundida puede transportarse en un cubo de agua.

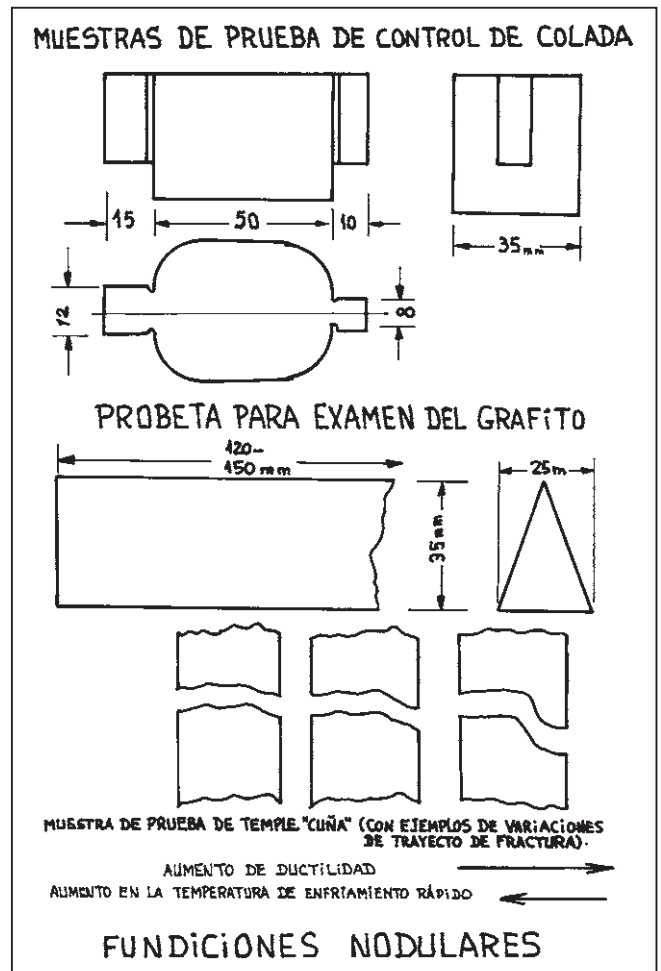


Figura 61.

Con los salientes de la probeta se prepara una superficie razonablemente plana con una muela. Con un disco de corte se obtiene suficiente alisado sin tener que esmerilar más. Para preparar la superficie cortada o esmerilada para examen se utiliza un abrasivo "mediano" y uno "fino", bien sea de banda o de disco de lijado. Las clases típicas son "M-1", "F-1", o malla de 100 y 200 (grano de 150 y 50 micras) o 400 y 600. El reconocimiento de la forma de grafito deberá ser factible en 35 a 55 segundos después de enfriar las muestras.

Otra prueba indicativa es la probeta normal de enfriado tipo cuña. El enfriamiento rápido deberá estandarizarse y, a ser posible, realizarse por debajo de 750 - 800 °C. Además del aspecto y color de la fractura, su forma, si se mira desde la base de la probeta proporciona una indicación útil. Esto se logra más eficazmente si se cuelan dos probetas del contenido de una misma cuchara, una de las cuales se deja enfriar a su aire hasta oscurecerse antes de introducirla en el agua para enfriamiento final.

#### Método operativo del Proceso Sandwich:

1. Añadir la aleación de magnesio en el alvéolo ("bolsa") de la cuchara de tratamiento, la cual debe estar limpia y a más de 1.000 °C.
2. Disponer el producto cubriente (chapas, carburo, etc.) tapando la aleación colocada en la bolsa.

3. Llenar la cuchara de caldo ininterrumpidamente y lo más rápido posible.
4. Una vez terminada la reacción del magnesio, desescoriar la cuchara.
5. Efectuar la inoculación en el momento de la transferencia del caldo a la cuchara de colada.

### 6.2.3. Campana de Inmersión

El proceso de nodulización mediante inmersión por campana fue el primer desarrollo importante producido tras la aparición de los métodos "over-pour" expuestos en epígrafes anteriores. Es muy versátil y puede emplearse en combinación con una variedad de nodulizantes que van desde aleaciones con 9% de magnesio hasta Mg puro, a temperaturas de tratamiento que van de 1.350 a 1.400 °C. La elección del nodulizante se ve condicionada por:

- Contenido de azufre en el hierro base.
- Contenido de silicio del hierro base.
- Rendimiento de recuperación del magnesio.

En el proceso de inmersión los trozos de magnesio o su aleación se envuelven en una lámina de chapa o lata vacía y se mantienen sumergidos hasta que todo el magnesio ha reaccionado, un tiempo que será función directa de la cantidad de caldo en la cuchara. Los orificios inferiores de la campana están dispuestos para que en ellos se asienten las varillas que evitan la caída prematura del bloque de magnesio antes de reaccionar.

Este sistema es un 30 - 50% más eficiente que los over-pour citados, lo cual se debe a la distancia que ha de recorrer el vapor de magnesio a través del líquido, obteniéndose un metal más limpio conteniendo menos óxido de magnesio. La reacción del magnesio queda confinada en la masa líquida de metal, originándose menos humo, llamaradas y salpicaduras. Los costos de operación son básicamente dependientes de la duración de las campanas, en un proceso que se caracteriza por su elevada consistencia y por la capacidad de implantación en cualquier planta de alta producción.

#### Cuchara de tratamiento:

En el proceso de inmersión se precisa una cuchara alta y esbelta por dos razones. En primer lugar, se precisa una reserva de altura para prever el recorrido vertical de la campana y para que tenga lugar hervido sin rebose (el volumen de caldo ocupa 1/3 a 2/3 del total de la cuchara). En segundo lugar, la recuperación de magnesio depende directamente de la distancia en vertical que el vapor de magnesio ha de recorrer durante su paso a través del hierro líquido; es decir, a mayor altura mayor recuperación. Una altura doble que el diámetro es un valor favorable para la cuchara. La Figura 62 muestra el esquema de montaje de conjunto.

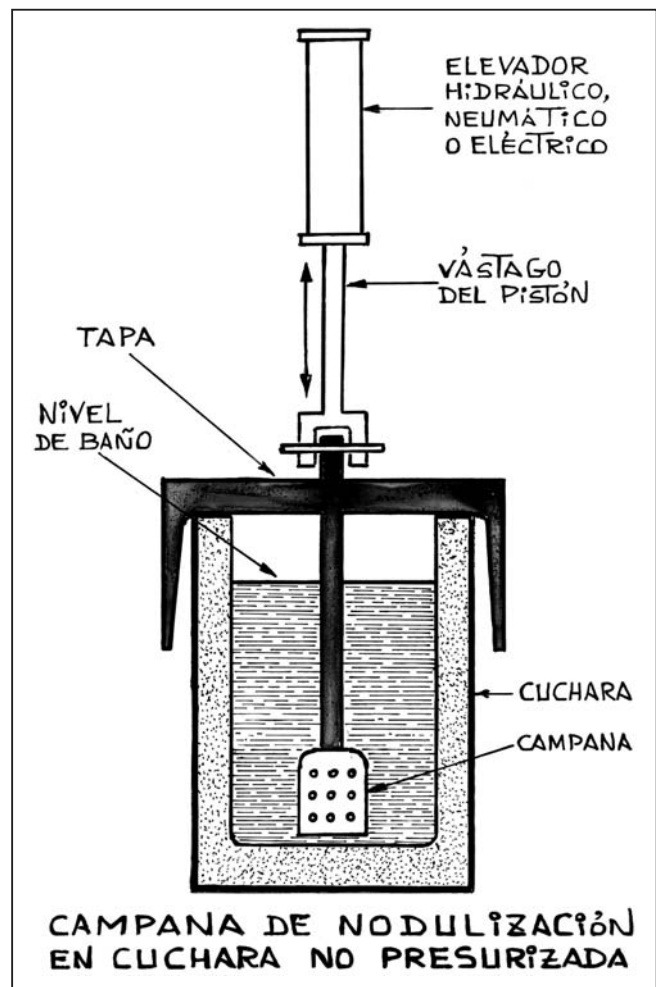


Figura 62.

En lo que respecta al revestimiento, hoy día se tiende a refractario neutro (pisé de alúmina - grafito por ejemplo) o básico (predominantemente magnesita) para minimizar la reacción entre un revestimiento ácido y la escoria básica de óxido de magnesio generada en el tratamiento. Esta reacción no sólo desgasta el revestimiento sino que disminuye el porcentaje de recuperación del magnesio.

#### Tapa de cuchara:

La función principal de este elemento es mantener sumergido el conjunto formado por la campana y la aleación de Mg más que crear una cámara presurizada. Para ello la tapa debe tener un peso igual a la mitad o tercera parte del caldo contenido en la cuchara. Caso de que se emplee cilindro hidráulico o neumático para desplazar verticalmente la tapa y la campana éstos pueden servir también para posicionar el conjunto. Hay un revestimiento refractario de unos 50 mm que evita agrietamiento y ataque a los órganos mecánicos de elevación.

La tapa se prolonga hacia abajo en un faldón de chapa de acero de 5 mm, de unos 500 mm de altura y revestida con pisé, que hace que las salpicaduras caigan verticalmente hacia abajo sin que se dispersen proyecciones. En el caso de cuchara semi-presurizada la tapa se hace de

hierro fundido, con un núcleo refractario que tiene un agujero central a través del cual pasan la campana y su vástago de sujeción. En este caso hay que prever dimensiones que compensen la dilatación del hierro fundido al cabo de varios tratamientos.

Mecanismo de inmersión:

La velocidad adecuada de inmersión es de unos 300 - 400 mm/s. Si la velocidad es lenta la reacción se produce antes de inmersión total, con la consiguiente disminución de recuperación de Mg y generación de riesgo laboral. Exceso de velocidad disminuirá la vida de la campana por el impacto contra el metal líquido. En cuanto al sistema de movimiento, puede estar basado en cilindros o polipastos.

Los cilindros, bien neumáticos, o bien hidráulicos, se emplean para cucharas grandes. Suelen estar rígidamente sujetos a vigas o pescantes de la instalación del taller con lo que es la cuchara la que se traslada, a y desde el cilindro, por medio de bandejas eléctricamente autotransportadas sobre raíles o carretillas elevadoras de horquilla ("toros"). Con este sistema puede reducirse el peso de la tapa en una cantidad aproximadamente igual a la potencia descendente transmitida por el cilindro. Este sistema es satisfactorio y bastante utilizado.

Los polipastos, bien neumáticos o bien eléctricos, se emplean en instalaciones relativamente pequeñas en las que se tratan cucharas con capacidades que no superan la tonelada de caldo. Estos mecanismos suelen estar sujetos a un monorraíl o puente grúa que los trasladan hasta la vertical de la cuchara de tratamiento.

Campana de inmersión:

Durante su trabajo la campana está expuesta a serios esfuerzos de choque térmico, impacto y erosión, de forma que su duración es función directa del cuidado que se ponga en su empleo. Las campanas pequeñas pueden tornearse a partir de un bloque de grafito; otras son de refractarios de alta alúmina o de mezclas de arcilla refractaria de alta alúmina y grafito (Figuras 63 y 64). La vida media de una campana está en unos 50 a 100 tratamientos. La escoria y óxido tienden a adherirse a las campanas de refractario, taponando los agujeros y dificultando el paso normal de los vapores de magnesio. Hay precauciones que alargan la vida útil de las campanas como:

Precalear la campana hasta el rojo blanco antes de cada operación reduce el choque térmico sufrido así como las pérdidas de temperatura en el tratamiento. Mantener la campana caliente entre cada dos tratamientos duplica su duración útil.

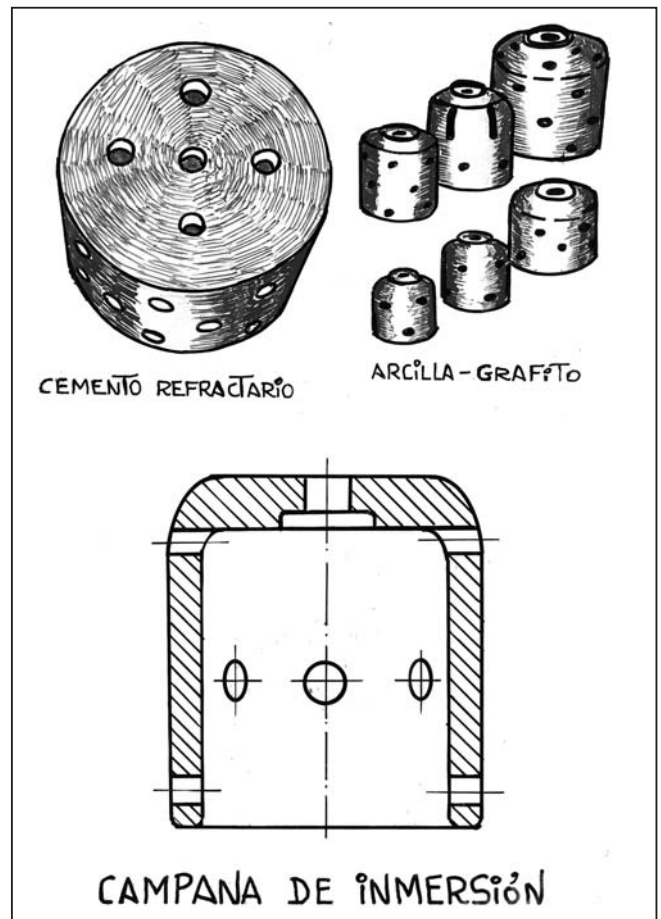


Figura 63.

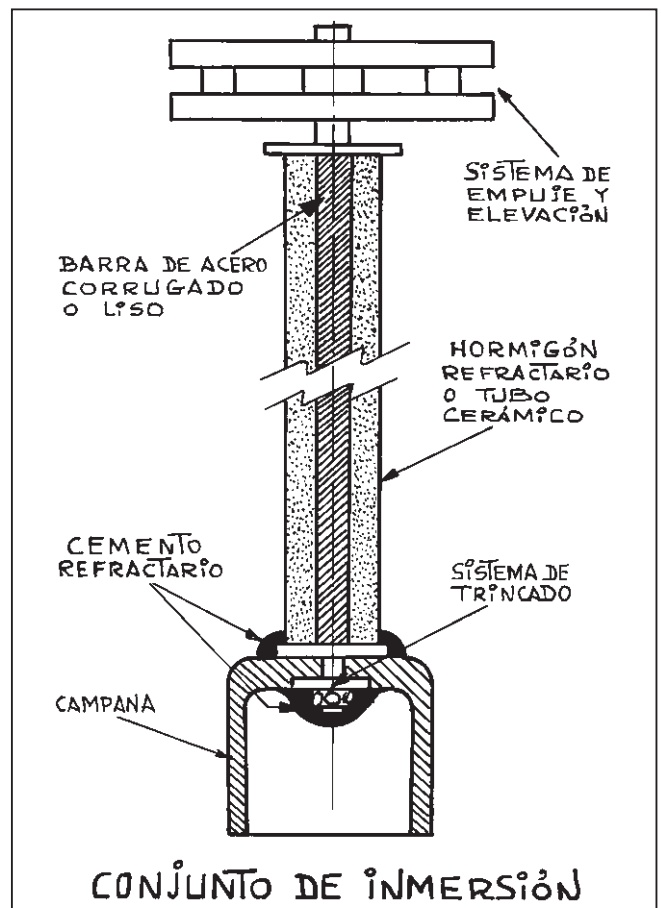


Figura 64.



La escoria y metal adheridos debe arrancarse cuando la campana está caliente, ya que los refractarios resisten mejor el choque mecánico de eliminación de la escoria. Esta eliminación es muy favorable, puesto que disminuye los gradientes térmicos y, en consecuencia, las tensiones generadas en la campana. El enfriamiento lento de las campanas disminuye la tendencia a la grieta y alarga la vida en servicio.

Método operativo del proceso de inmersión:

1. Precalentar cuchara y campana hasta unos 1000 °C.
2. Colocar la lata con la aleación nodulizante en la campana y sujetarla en ésta por medio de varillas.
3. Llenar la cuchara de tratamiento con caldo a la temperatura prevista.
4. Sumergir en el caldo la campana que contiene el material de tratamiento.
5. Mantener sumergida la campana el tiempo predeterminado y extraerla después, lo que se nota porque cuando la reacción se ha completado cesan las vibraciones.
6. Desnatar la escoria de la cuchara de inmersión.
7. Para el siguiente tratamiento es preciso limpiar la campana y llevarla a la temperatura prevista.

#### 6.2.4. Método de Inyección

Según se entendió en sus comienzos, el proceso de inyección consta de dos etapas, las cuales son desulfuración y nodulización. La fase de desulfuración se efectúa inyectando carburo de cal, vehiculado por nitrógeno, en el hierro líquido. En la segunda etapa se inyecta granalla fina de magnesio metálico. El esquema de montaje se representa en la Figura 65.

#### 6.2.5. Método de cámara de presión

En este proceso la cuchara de tratamiento con la fundición líquida se coloca en una cámara cerrada en la que la presión se lleva hasta unas 30 atmósferas. A continuación se deja caer el magnesio sobre el caldo. La fuerte presión existente en la cámara eleva el punto de ebullición del magnesio hasta ser más alto que la temperatura de la fundición líquida de la cuchara. Sin dejar de mantener esa presión se somete el caldo a una enérgica agitación que lo mezcla íntimamente con el magnesio líquido. Asociado a secuencia de sobre-tratamiento/dilución, este proceso alcanza una recuperación de magnesio del 70 – 80%.

Este proceso es bastante flexible y puede emplearse en el tratamiento de cantidades muy variables de fundición. Por otra parte, el empleo de magnesio metálico evita la necesidad, muchas veces indeseable, de introducir cantidades excesivas de silicio en la fundición. Como ven-

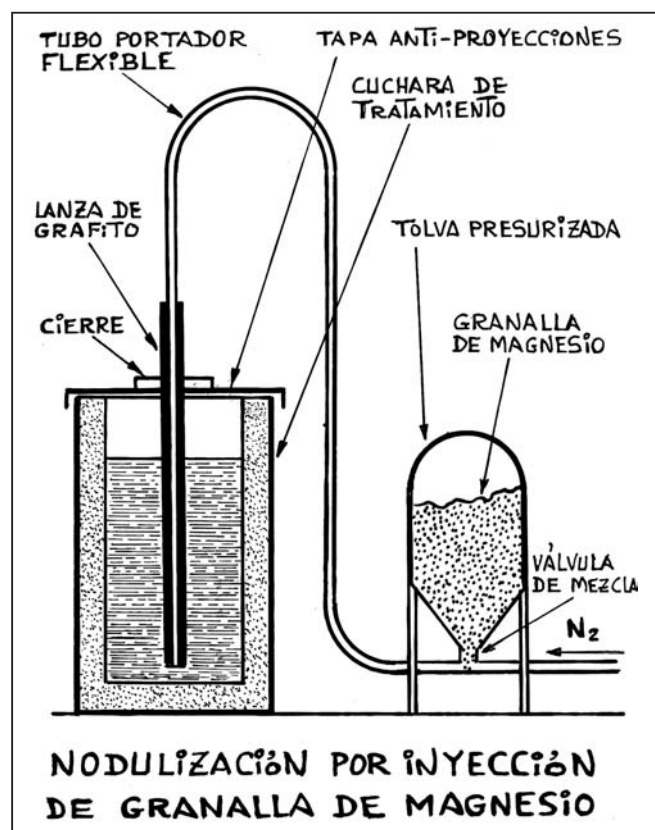


Figura 65.

taja adicional, la posibilidad de desulfurar permite emplear hierro base procedente de cubilote.

Hay desventajas. Se pueden citar las elevadas pérdidas de temperatura inherentes a este proceso, caídas ocasionales de los elementos alimentadores al caldo, recuperaciones erráticas de magnesio y costo de la granalla de este metal. Por ello este método, desarrollado en Francia para fabricación de tubos por Pont-a-Mouson, y conocido en Japón como Proceso Kabota, no ha tenido gran difusión.

#### 6.2.6. Nodulización en cuchara sellada

Se trata de un proceso relativamente complicado, desarrollado en Alemania por Schuchterman y Kember-Baum AG, en el que la cuchara de tratamiento actúa como verdadera cámara de presión. Como puede verse en el esquema de la Figura 66, la tapa de la cuchara aloja el tapón y soporte de una barra que sumerge en la fundición líquida un lingote de magnesio previamente colocado en el interior de un tubo de acero. En su extremo superior el tubo se sujeta firmemente al vástago protegido por refractario y en el inferior está abierto. Así se consigue forzar el vapor de magnesio en sentido descendente hasta la máxima profundidad posible antes que comience a burbujear ha través de la masa de fundición líquida.

(Continuará)



## PRÁCTICA DE FUNDICIÓN: FABRICACIÓN DE FUNDICIÓN NODULAR (Parte 8)

José Luis Enríquez  
Enrique Tremps

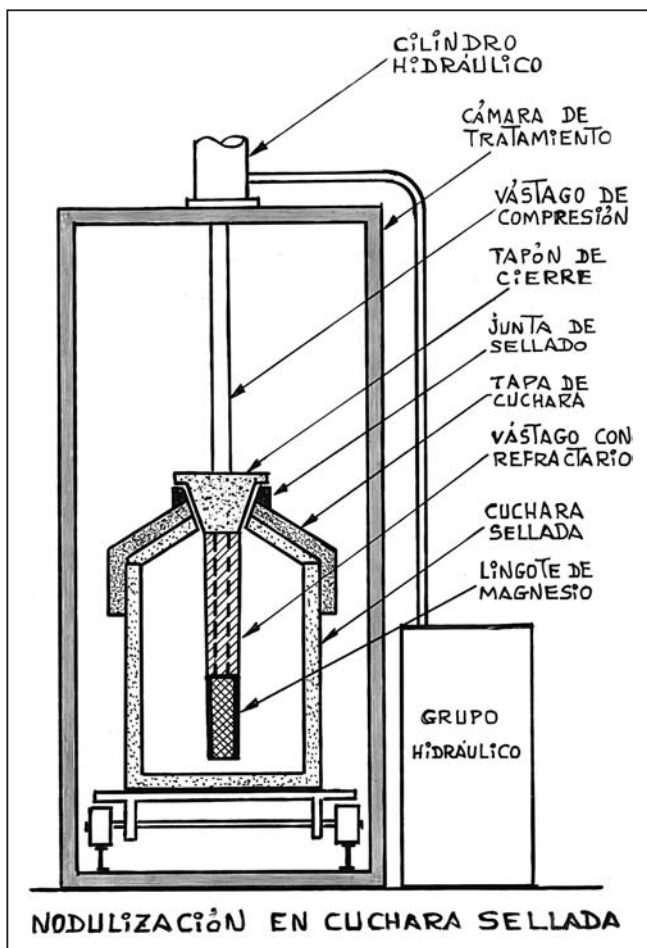


Figura 66.

La duración del tratamiento es de unos 2 minutos, en los que reacciona una adición de 1,5 - 2 kg de magnesio por tonelada de fundición; el proceso se combina con el de sobre-tratamiento/dilución, según proporciones de 4 a 1. Este proceso no ha gozado de gran aceptación debido a

los múltiples pasos que conlleva su realización y a la dificultad de alcanzar un buen sellado de la cuchara de nodulización.

### Método de Tapón Poroso

Concebido inicialmente como proceso de desulfuración, se extendió posteriormente al tratamiento esferoidizador de fundiciones a partir de hierros base elaborados en cubilote ácido. Las pérdidas térmicas sufridas en ambos tratamientos hacen que no sea adecuado para tubos o piezas delgadas, salvo que se realice un recalentamiento subsiguiente en horno eléctrico. En cambio, el método resulta satisfactorio para piezas gruesas, superiores a 500 kg, con temperaturas de colada no superiores a 1.300 °C.

El proceso (Figura 67) consiste en la agitación del metal (que en ese momento recibe la aleación nodulizante) mediante la insuflación de nitrógeno o argón a través de un tapón poroso emplazado en el fondo de la cuchara. Su paternidad es reclamada por la British Cast Iron Research Association y por J. Galey de L'Air Liquide. Cuando se añade un nodulizante, como Fe Si Mg, sobre la superficie agitada del líquido en movimiento, parte del agente será forzado a descender hacia el fondo de la cuchara, mientras que líquido nuevo se pone en contacto con el material que permanece en la superficie. La cantidad de gas inyectado es relativamente pequeña, como también lo es, en consecuencia, el enfriamiento sufrido, enfriamiento que se produce por radiación y cuya cuantía es proporcional a la duración del tratamiento.

Como es sabido, la producción de fundición nodular exige un sistema que haga posible la introducción de magnesio o aleación del mismo en el hierro líquido, lo cual obliga a resolver algunas dificultades derivadas del

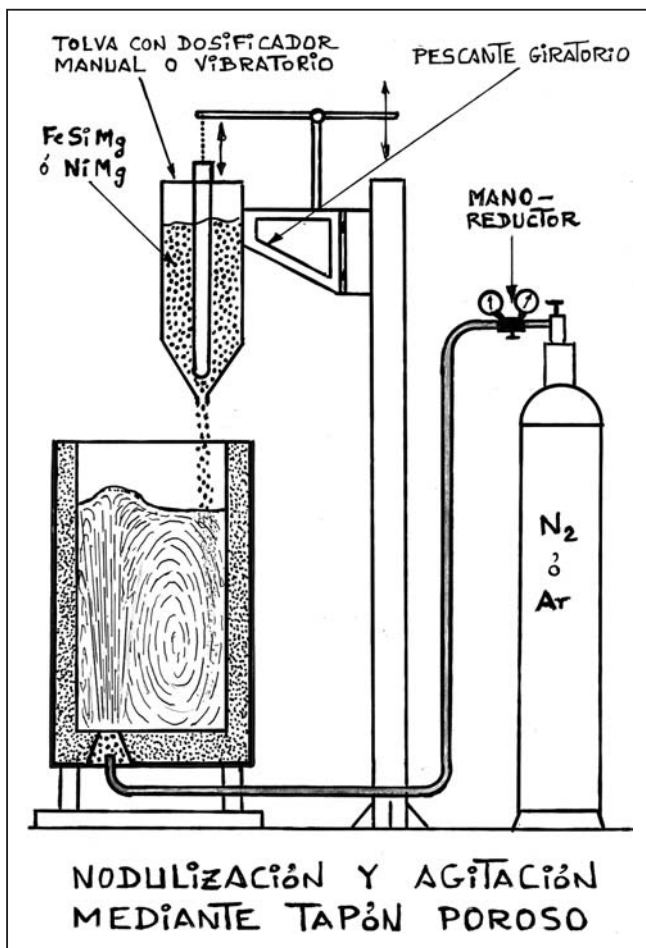


Figura 67.

punto de ebullición y presión de vapor del magnesio, así como de su gran afinidad por el oxígeno y el azufre. Todo ello provoca pérdidas de magnesio que obligan a adiciones superiores a las teóricamente necesarias.

Equipo utilizado:

Tanto las cucharas como los tapones porosos se describieron al tratar de la desulfuración con tapón poroso, por lo que no se vuelve con lo mismo.

Características operativas:

Después del desescoriado de la cuchara se comienza la insuflación de gas y se añade el agente nodulizante, a veces mezclado con el post-inoculante, mediante una canaleta, tolva o, preferiblemente, un dosificador vibratorio. La insuflación de gas dura, según cantidad de caldo, entre 30 segundos y 2 minutos. Después del tratamiento se desconecta el acoplamiento de la manguera flexible y se cuela la cuchara.

El nodulizante suele ser Ni Mg o Fe Si Mg, con o sin calcio o cerio, en tamaño no inferior a 20 mm, libre de finos o gruesos. Su contenido de magnesio no es significativo y sólo influye en la cantidad de aleación que se precisa, cantidad que se reducirá sustancialmente si la agitación

es completa. Si se emplea Fe Si Mg de 14 - 15% Mg basta con un 0,8 - 1,5% de aleación, según sea la cantidad de fundición a tratar.

El magnesio retenido, 30 - 60%, depende del tipo de aleación y del peso de metal tratado. Usualmente es mayor que en otros procesos, dentro del objetivo básico de mantener mínima la cantidad de magnesio residual, compatiblemente con el grado deseado de nodulización, a fin de minimizar la aparición de puntos duros. Parece también que la insuflación de nitrógeno contribuye también a ralentizar el desvanecimiento de la acción nodulizante. Adicionalmente, la formación de escoria oxidada ("dross") disminuye considerablemente cuando se añade magnesio a un caldo bien desulfurado. La experiencia industrial muestra que un flujo de burbujas pequeñas ayuda a decantar la escoria.

#### 6.2.8. Proceso T - Nock

Desarrollado en Holanda por el Instituto de Investigación Científica de Delft es en parte un proceso de inyección. En la práctica (Figuras 46 y 47) se coloca una caja con una piqueta sobre la cuchara de tratamiento. El hierro base fluye por la piqueta formándose una corriente con hueco en su zona central. La salida del bacinillo de colada tiene una tobera o buza de refractario apisonado o ladrillo prefabricado sobre la cual se inserta un tubo de carburo de silicio. Es a través de este tubo de carburo de silicio por donde se alimenta el Fe Si Mg a la corriente tubular de hierro líquido cuando ésta sale por la tobera o buza. Este artificio permite el mezclado de las aleaciones sólidas en el centro de la corriente. Se evita una reacción excesiva con el oxígeno del aire y se obtienen muy buenas recuperaciones de magnesio.

A veces se protege el chorro y la superficie del metal con una llama reductora de gas para evitar oxidación y enfriamiento. La cantidad adecuada de metal a tratar oscila entre 500 y 2.500 kg, utilizándose indistintamente Ni Mg o Fe Si Mg. El ferrosilicio de post-inoculación se suele aportar simultáneamente con el nodulizante.

Método operativo:

1. Cuchara de tratamiento y bacinillo de colada se calientan a 1.000 °C.
2. Se hace llegar la cantidad prevista de fundición líquida, que estará entre 1.350 y 1.400 °C.
3. Cuando comienza a pasar fundición por el bacinillo se añade Fe Si Mg a la corriente de metal a través del tubo de carborundum.
4. Por medio de un dosificador vibratorio se añade la cantidad calculada de Fe Si Mg a través del tubo de carborundum. Todas las aleaciones de tratamiento se añaden durante el paso del 50 a 70% del total a tratar. Después, durante el paso de la cantidad final, se

hace la inoculación con Fe Si. En este proceso puede resultar favorable utilizar un nodulizante que haga innecesaria la post-inoculación.

Se citan recuperaciones de magnesio del orden del 75% a temperaturas de tratamiento de 1350 °C. La reacción es relativamente suave, si bien hay que tomar precauciones de seguridad. Finalmente, hay que consignar que la duración del revestimiento del bacino de colada es de 40 a 80 tratamientos, según sea la calidad del material refractario empleado.

### 6.2.9. Proceso Instream

Es un desarrollo inglés también conocido con las denominaciones "Flotret" y "Flow-through". Se parte de una fundición base con menos de 0,015% de azufre a la que se hace pasar por una cámara refractaria especialmente diseñada, que se construye mediante el ensamblaje de refractarios, tal como se ve en las Figuras 68 y 69. Esta unidad de tratamiento consta fundamentalmente de bacino de colada, cámara de reacción del nodulizante y cámara de expansión.

En este proceso, el caldo que reacciona con el nodulizante se estanca y frena el flujo del líquido que entra después a la cámara de reacción, con lo que se mejora la

eficiencia del tratamiento. Esto se da porque se produce una contrapresión cuando el nivel de llenado es ya alto.

Este proceso se emplea para tratar cantidades unitarias de hierro no superiores a 1.000 kg. Consiste en hacer llegar la cantidad dosificada de fundición, la cual pasa sobre el nodulizante, previamente colocado en su alvéolo, y cae a la cuchara, donde continúa reaccionando el sobrante a la vez que recibe el Fe Si 75% de inoculación. Este método de tratamiento se da con ausencia casi completa de humo y fognazos entre las posiciones de entrada y de salida. La unidad puede recargarse y, con algún cuidado, es auto-limpiable. Hay dos factores fundamentales para llegar a una operación satisfactoria de la unidad de tratamiento:

- La relación de secciones de entrada y salida de la cámara de tratamiento produce una acción de "choke" análoga a la que se produce en los sistemas de colada. Esta relación debe ser mayor que 2 : 1, con lo que el sistema se mantiene limpio y se optimiza el comportamiento del Fe Si Mg.
- La disolución del nodulizante viene regulada por la relación preestablecida entre las dimensiones de la cámara de tratamiento y el caudal de metal. Es fundamental asegurar de forma completa la disolución para garantizar la limpieza de la cámara de tratamiento.

El proceso Instream se ha empleado para tratamientos unitarios hasta 1.000 kg y pueden procesarse hasta 20 cucharas sin que se produzcan adherencias ("lobos") en la cámara. El consumo de aleación nodulizante es de 0,7 – 0,9% de Fe Si Mg de 5% de magnesio contenido. Puede haber problemas, como llamaradas de retroceso, si no se mantiene constante el caudal de tratamiento, ignición prematura del nodulizante en la cámara de reacción y formación de adherencias en el alvéolo destinado al nodulizante.

### 6.3.3. Proceso Inmold

Uno de los desarrollos más modernos que se han producido en la esferoidización de la fundición líquida ha sido el tratamiento de ésta a su entrada en el molde. Es un proceso sencillo en el que el agente nodulizante se coloca en una cámara especial de reacción intercalada en el sistema de colada. Este proceso está basado en dos premisas fundamentales:

- Partir de un hierro base desulfurado y limpio (menos de 0,010% S).
- La corriente líquida debe ponerse en contacto con el nodulizante, de forma tal que se produzca reacción controlada a velocidad uniforme durante el tiempo de llenado de la cavidad de molde, sin contaminación de residuos o inclusiones de escoria.

La investigación práctica ha llevado a la conclusión de que hay una relación estrecha entre la velocidad de di-

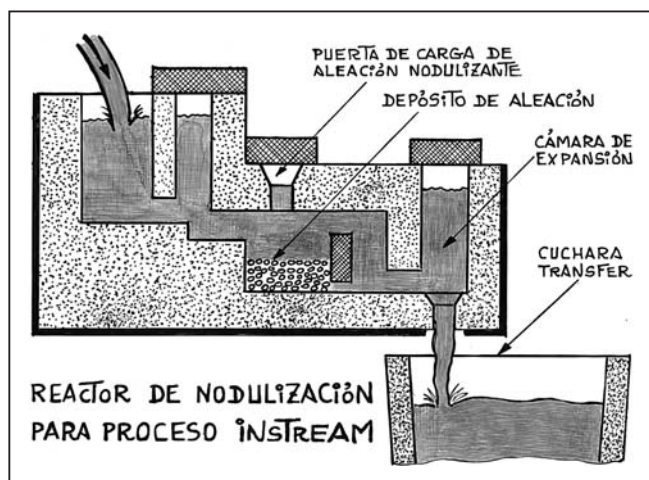


Figura 68.

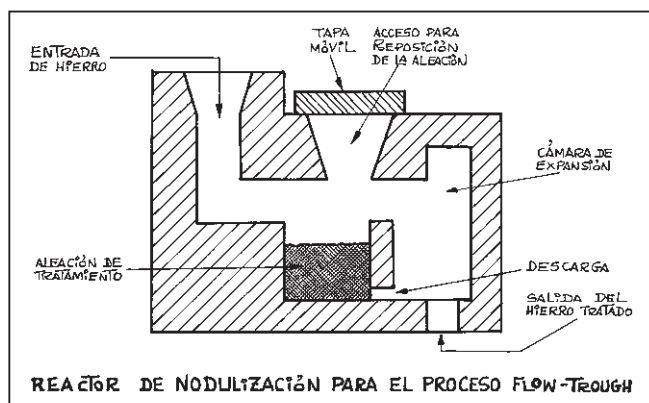


Figura 69.



solución del nodulizante y el cociente entre la velocidad de colada y las dimensiones de la cámara de procesado.

El conocimiento y aplicación de este factor de disolución, junto con el hecho de que la reacción se da prácticamente sin contacto con el aire, hace posible alcanzar rendimientos de recuperación de magnesio superiores al 80%. Esto lleva a que el consumo de nodulizante es mitad, para el mismo grado de nodularidad pretendido, que el obtenido en procesos sandwich o de inmersión, simultáneamente con la circunstancia de que todas las piezas se fabrican igual y presentarán, lógicamente, la misma estructura y propiedades.

Para minimizar la cantidad de carburos y controlar la estructura de la matriz se incluyen adiciones de 2 – 5 g de ferrosilicio en polvo a las piezas que pesan menos de 50 kg. Se pueden colar piezas de pesos que van desde unos gramos hasta 250 kg o más.

Piezas muy delgadas y de poco peso pueden dar problemas de formación de carburos. Por el contrario, piezas gruesas y de más de 250 kg de peso, con enfriamiento consiguientemente lento, originan problemas de desvanecimiento de la acción nodulizante y de estratificación de tipos de grafito.

Con el proceso Inmold los mejores resultados se han obtenido para piezas de 5 – 150 kg de peso y espesores de 10 – 100 mm. La utilización de inoculantes dopados con tierras raras atenúa los problemas derivados de piezas más gruesas. En cuanto a las delgadas, es preciso intercalar inoculante entre la cámara de reacción y los ataques a la cavidad de molde a fin de frenar la formación de carburos. En cuanto a los efectos de la presencia de manganeso, es preciso trabajar con hierros base con 0,15 – 0,20% de este elemento si se desea obtener fundiciones ferríticas en bruto de colada. Para piezas de sección muy delgada hay que trabajar con fundición líquida base de bajo manganeso, lo que se consigue con cargas formadas por lingote Sorelmental y retornos del mismo nodular que se está fabricando.

La figura 70 muestra el esquema de un molde elaborado para colar una pieza de nodular según el proceso Inmold. Las figuras 71 y 72 dan ideas de diseño de la cámara de reacción y artificios de regulación de flujo y atrape de escoria. En algunos casos, especialmente aquellos en los que el molde se elabora con arena aglutinada con bentonita en lugar de arena aglomerada con resinas, el sistema de colada y cámara de reacción se hacen en paquete de machos. En el caso de fabricación de piezas grandes, de más de una tonelada de peso, hay que disponer dos o más cámaras de reacción que han de ser idénticas entre sí.

Las propiedades mecánicas de piezas de fundición fabricadas según proceso Inmold son más o menos igua-

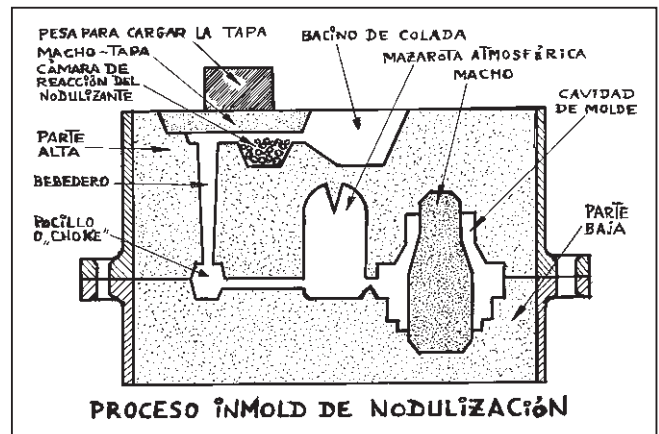


Figura 70.

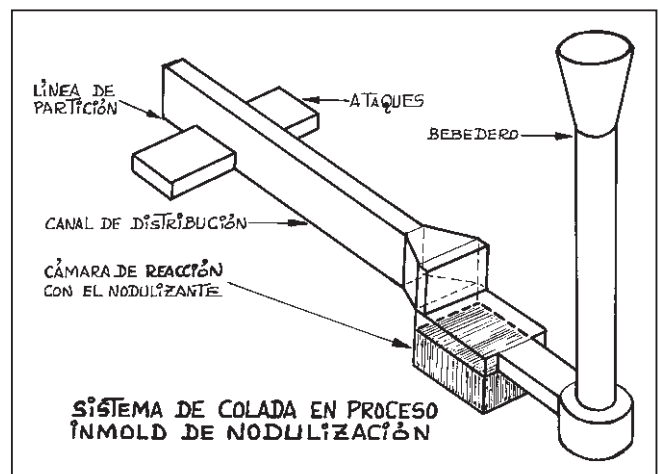


Figura 71.

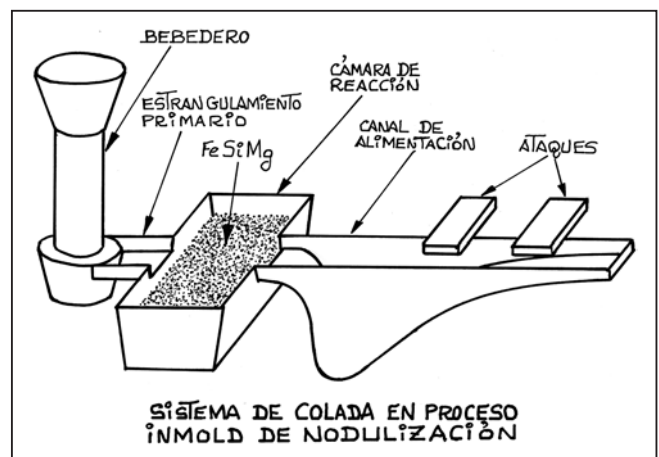


Figura 72.

les que con otros procesos. Sin embargo, hay que tener presente que, a efectos prácticos, cada pieza es una colada diferente, de manera que hay que realizar control de grado de nodulización en todas y cada una de las piezas. El ultrasonido parece la respuesta lógica a esta exigencia.

(Continuará)



## PRÁCTICA DE FUNDICIÓN: FABRICACIÓN DE FUNDICIÓN NODULAR (Parte 9)

*José Luis Enríquez  
Enrique Tremps*

### 6.2.11. Convertidor Fisher

Este procedimiento fue desarrollado por George Fisher Limited, de Schaffhausen, Suiza (algunos dicen que el primer convertidor se diseñó y operó en la antigua Unión Soviética) y se difundió en otros países de Europa, construyéndose convertidores que llegan a 4.000 kg de capacidad unitaria. Se emplea magnesio metal y no Fe Si Mg o Ni Mg, lo que permite emplear cargas con elevado porcentaje de retornos altos en silicio sin que haya riesgo de llevar el contenido de este metal hasta niveles inaceptables.

El convertidor Fisher es un recipiente muy similar en diseño y operación a los antiguos convertidores Bessemer. Está revestido de refractario y montado sobre un sistema de apoyo y basculación. En el fondo hay una cámara de apertura y cierre independiente, en la que se alojan los lingotes o granalla de magnesio nodulizante. El procedimiento de trabajo, representado esquemáticamente en las figuras 73 y 74, es el siguiente:

1. Se pone el convertidor en posición horizontal (figura 73) y se llena de caldo. Nótese que la cámara de reacción queda por encima del nivel máximo de la fundición líquida y no se pone en contacto con la misma mientras el convertidor mantenga esta posición horizontal.
2. Estando aún el convertidor en esa posición, y completado el llenado, se carga la cámara de reacción con la cantidad prevista de lingotes o granalla de magnesio (envuelta en chapa protectora). Después se tapa, lo cual se suele hacer con un cilindro neumático.
3. Se cierra la puerta hermética de carga y se bascula el convertidor hasta posición vertical, con lo que la fundición penetra en la cámara de reacción y su calor hace

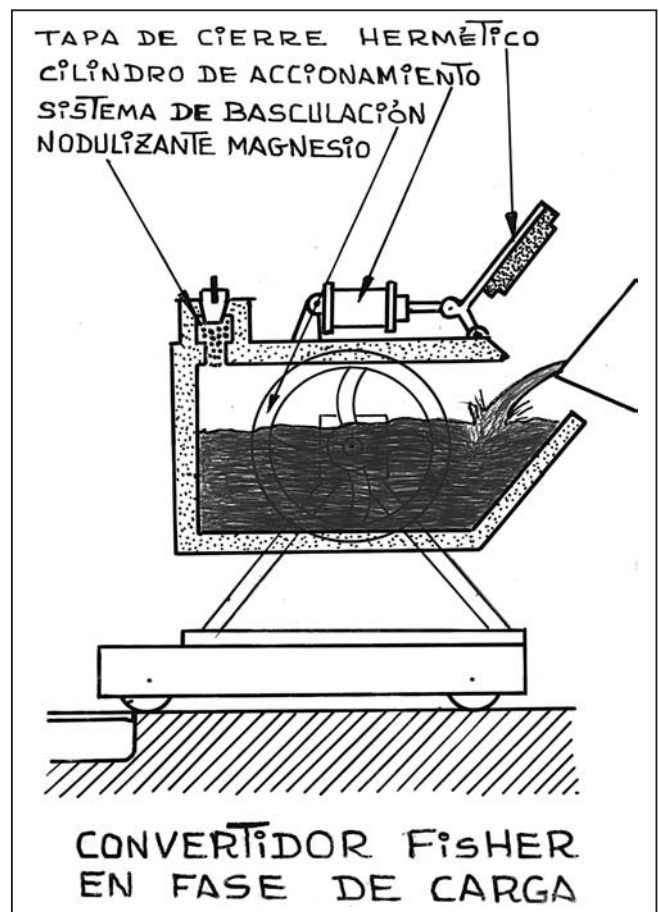


Figura 73.

- que el magnesio se vaporice. El cierre de la puerta hace que la presión en el interior del convertidor suba algo. El tiempo de tratamiento para un convertidor de una tonelada de capacidad es de 60 a 70 segundos.
4. Una vez terminada la reacción nodulizante se abre la tapa hermética y se bascula el convertidor hasta la

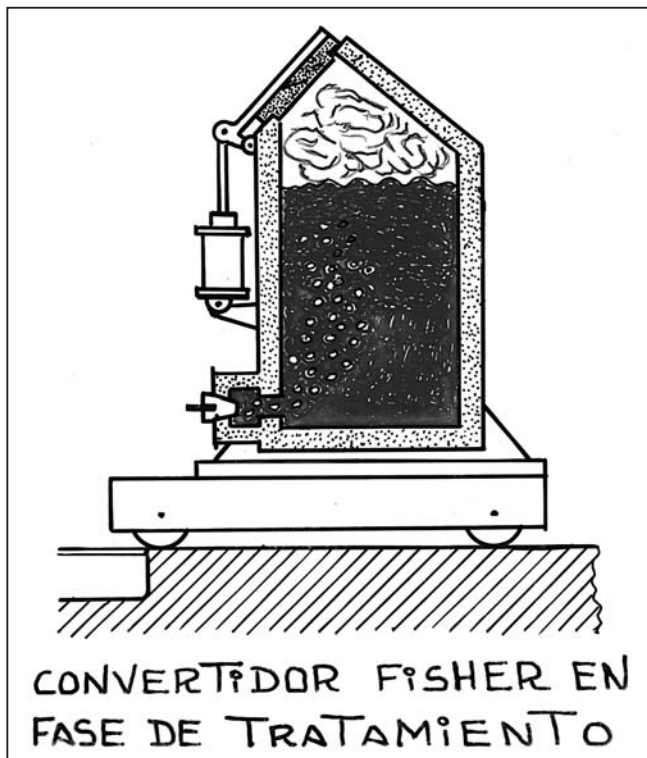


Figura 74.

posición de vaciado. El hierro tratado se trasvasa a las cucharas de colada, realizándose la inoculación con ferrosilicio en ese momento.

En este proceso las recuperaciones de magnesio son del 50 al 65%. En la mayoría de las fundiciones europeas que lo adoptaron se empleaba para desulfurar y nodulizar fundiciones de cubilote. La reacción de tratamiento en el convertidor es muy violenta, por lo que hay que poner gran cuidado en el mantenimiento y operación de este convertidor para evitar accidentes.

Un factor limitador en la operación del convertidor Fisher es la vida en servicio de los refractarios de la cámara de reacción. En fundiciones europeas se citan duraciones de 150 o más tratamientos, mientras que en los Estados Unidos se citan resultados bastante menos favorables. Los usuarios de este sistema alegan algunas ventajas como:

- Pueden tratarse hierros base procedentes de cubilote ácido sin necesidad de desulfuración previa.
- La fundición nodular obtenida en el convertidor es más limpia y contiene menos escoria y  $MgO$ .
- No hay limitación en la cantidad de retornos de fundición que pueden emplearse en la carga fría del horno primario de fusión.
- Como nodulizante se emplea magnesio metal, que es bastante más barato que sus ferroaleaciones.
- Control más exacto de la composición del nodular y mermas de carbono relativamente bajas.

No obstante, hay desventajas. Por ejemplo, la desulfuración que se produce a costa del magnesio puede produ-

cir efectos debidos a "dross"; el tratamiento de cantidades pequeñas de fundición origina pérdidas sensibles de temperatura; en algún caso, el rendimiento de recuperación del magnesio puede tener valores erráticos; y, finalmente, el mantenimiento del equipo es bastante más complicado y costoso que el de una cuchara empleada en procesos que podían denominarse como "clásicos".

#### 6.2.12. Nodulización con Mag - Coke

El mag-coke es un coque metalúrgico totalmente impregnado con magnesio, con un contenido de más del 43% de este elemento. Al entrar en contacto con el metal líquido, el magnesio que hay en la superficie del mag-coke se vaporiza muy rápidamente y, seguidamente, a medida que el calor del metal va penetrando en el trozo de coque, va siendo menor la superficie de  $Mg$  a vaporizar; por tanto, para una profundidad de penetración constante del frente de calor, la cantidad de  $Mg$  liberado por unidad de tiempo va decreciendo progresivamente.

Las recuperaciones de magnesio con este producto, cuando se emplea en combinación con campana de inmersión, son siempre relativamente bajas, del orden de 18 a 20%. Las mejoras implantadas posteriormente, como la cuchara con fondo móvil desarmable o la cuchara con cornisa, han permitido llegar a rendimientos del 30%. A continuación se describen las distintas modalidades de equipos:

#### Método de inmersión por campana:

El mag-coke se coloca en una campana de grafito o mortero aluminoso, sumergiendo todo el conjunto en el baño (figura 75). Es el método más eficiente, siendo adecuado para tratamientos desde 500 kg hasta varias toneladas. Hasta 2.000 kg, las cucharas deben tener altura doble que el diámetro. Para evitar salpicaduras, la altura del metal líquido en la cuchara no debe ser mayor que el 65% de la altura total interior de ésta.

La campana y vástago de inmersión van fijados a una tapa que, por su peso (la mitad del peso de caldo a tratar), contrarresta la fuerza ascensional de los vapores de magnesio y ayuda a introducir la campana en el baño. Dicha tapa o cubierta lleva acoplado un faldón protector en todo su perímetro, reduciéndose humos y deslumbramiento y orientándose al suelo las posibles salpicaduras.

El conjunto puede suspenderse de una grúa o fijarse a un sistema mecánico o neumático de inmersión. La tapa puede llevar un extractor de humos. El tiempo de inmersión oscila entre 1 y 4 minutos. Para reducir la turbulencia y aumentar la recuperación de magnesio deben seguirse las siguientes reglas básicas:

- La distancia entre el borde inferior de la campana y el revestimiento del fondo de la cuchara debe ser de 50 mm.
- Entre la parte exterior de la campana y el revesti-

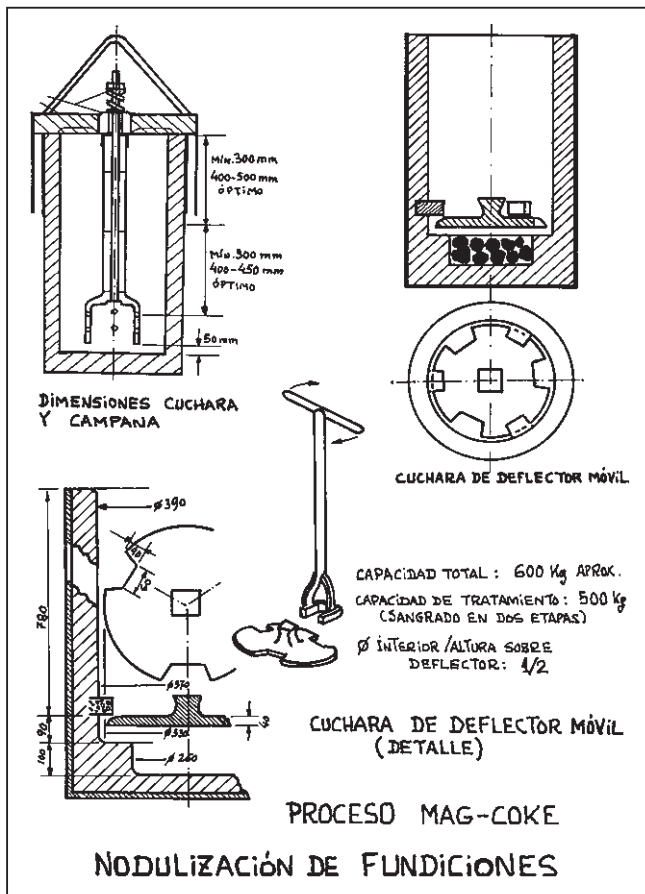


Figura 75.

miento del fondo de la cuchara debe haber una holgura de más de 100 mm en todo su alrededor.

- La altura de metal líquido sobre los agujeros superiores de la campana debe ser superior a 300 mm.

#### Cuchara con deflector móvil:

Este método, descrito en la misma figura 75, se emplea para tratamientos de hasta 500 kg. El mag-coke se coloca en una cavidad circular situada en el fondo de la cuchara. Un deflector móvil mantiene el producto en posición durante el tratamiento. La flotación del deflector se evita mediante tres topes refractarios alojados en el revestimiento de la cuchara a 120° entre sí.

Al cesar la reacción se vierte el metal tratado, se saca el deflector y, dando la vuelta a la cuchara, se extrae el coque consumido. Se coloca seguidamente nuevo mag-coke en la cavidad, se introduce el deflector y, a continuación, ya puede efectuarse otro tratamiento. Como deflectores pueden utilizarse las clásicas tapas de grafito normalmente utilizadas en la fusión en crisol. En la figura se muestra este sistema con más detalle, así como la herramienta necesaria para la extracción del deflector.

#### Cuchara con vástago de cierre:

Este tipo de cuchara se emplea también para tratamientos de hasta 500 kg. Se muestra en la figura 76. El coque

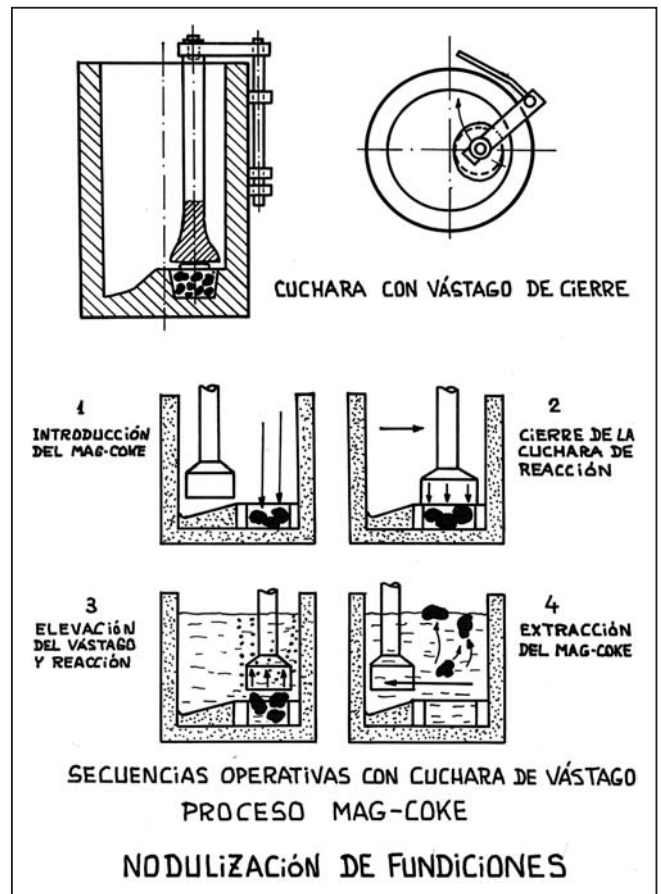


Figura 76.

se introduce en una cavidad existente en el fondo de la cuchara. Para evitar su flotación y para retardar el contacto con el caldo, un vástago de cierre obtura la cámara de reacción. El vástago está acoplado a un sistema similar al de las cucharas de buza empleadas en acería, con lo que puede efectuarse el movimiento de ascenso y descenso del vástago, así como el desplazamiento lateral de éste para permitir la flotación del mag-coke ya consumido. Como se muestra en la figura citada, las secuencias son:

1. Colocar el vástago de cierre sobre la cámara de reacción y, mediante el mecanismo correspondiente, fijarlo de forma que el vástago quede a unos 15 ó 20 mm de la cámara citada.
2. Desplazar lateralmente el vástago y dejar libre la cavidad del fondo de la cuchara.
3. Colocar la cantidad prevista de mag-coke.
4. Colocar de nuevo el vástago de cierre sobre la cámara.
5. Descender el vástago de cierre y sujetarlo firmemente mediante el mecanismo correspondiente.
6. Verter el caldo en la cuchara lo más rápidamente posible.
7. Elevar el vástago unos 20 mm y dejar que continúe la reacción.
8. Cesada la reacción, se libera el movimiento lateral del vástago y se desplaza éste para permitir la flota-



ción del coque agotado; fijar el vástago en la posición actual.

9. Sacar el coque flotante agotado y la escoria producida.

Cuchara de fondo móvil desmontable:

La cuchara de tratamiento está dividida en dos secciones separables e independientes. La superior es una virola revestida con refractario y la inferior es un fondo de cuchara también revestido (figura 77). En la parte inferior de la virola se inserta un disco de alúmina con perforaciones. La parte inferior, desmontable, tiene por objeto alojar el mag-coke.

En la preparación para cada tratamiento la base móvil conteniendo el coque impregnado de magnesio se une a la parte superior cilíndrica. El sellado de la junta se consigue mediante arena de moldeo atacada. El cierre mecánico se efectúa con un sistema parecido a las orejas y espigas con las que se cierran las dos cajas de un molde, apretándose ambas orejas mediante unas chavetas. En la figura se representa el sistema de forma sobredimensionada para facilitar su comprensión.

La operación de tratamiento consiste en llenar la cuchara de la cantidad prefijada de fundición en el menor tiempo posible. Esta técnica ha resultado exitosa en la produc-

ción de grandes cantidades unitarias de fundición nodular destinada a la fabricación de tubos. Aunque sencilla, la preparación de la cuchara para el tratamiento exige un tiempo sustancial, por lo que el sistema no es adecuado para el tratamiento continuo de cucharas pequeñas destinadas a alimentar, por ejemplo, un moldeo mecánico.

Cuchara de cornisa:

Vista en la figura 78, se trata de una cuchara cilíndrica muy esbelta (a pesar de lo que parece indicar la figura) con una relación altura / diámetro de aproximadamente 3 a 1. A un quinto de la altura total, medido desde el fondo, hay una repisa perforada que tiene un ángulo de unos 5° de inclinación con respecto a un plano horizontal. En la parte más baja de esta cornisa hay una abertura cuya superficie es aproximadamente el 15% de la sección recta total de la cuchara. La operación es relativamente sencilla. Un tratamiento normal según este sistema sería el siguiente:

1. Se adiciona la cantidad prevista de coque de magnesio a través de la abertura practicada en la cornisa, basculando la cuchara para que ese coque se coloque bajo la cornisa.
2. A continuación se llena la cuchara de caldo lo más rápidamente posible y se espera hasta que cesa la reacción del tratamiento.

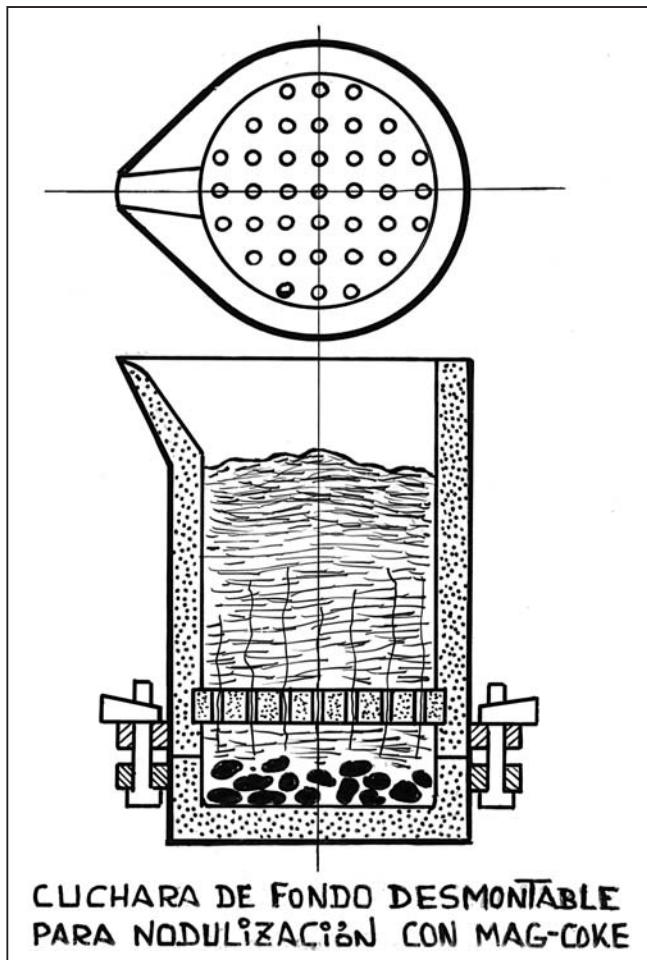


Figura 77.

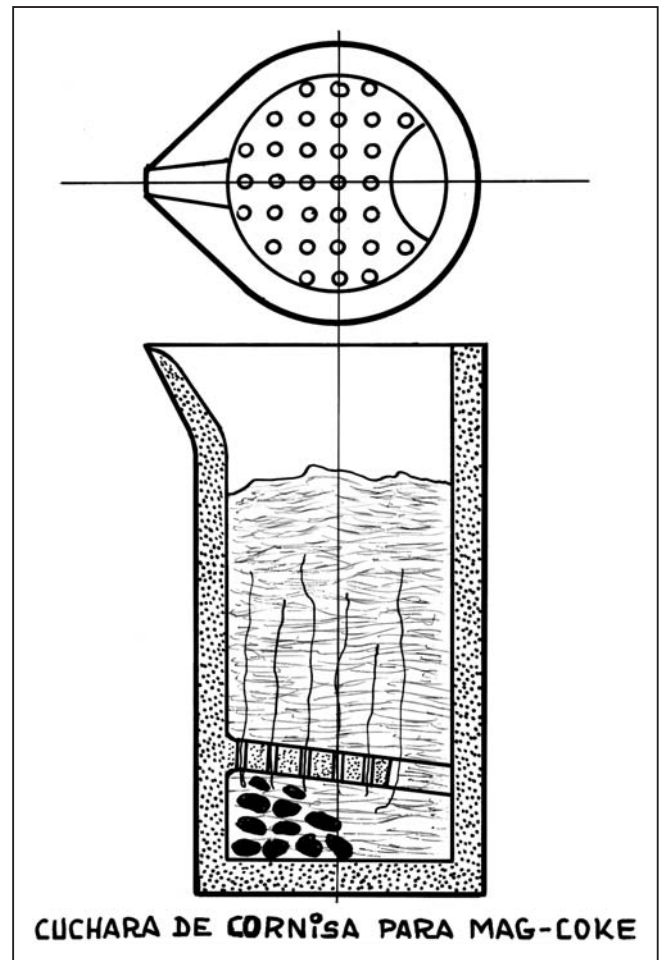


Figura 78.



3. Se extrae de la cuchara el metal tratado y se inocula.
4. Una vez vacía de caldo la cuchara se bascula hasta quedar invertida y se extrae el coque agotado.

Este tipo de cuchara se adapta eficientemente al tratamiento con mag-coke de cantidades relativamente pequeñas de fundición. En cuanto a la proporción de adición, las consideraciones teóricas enunciadas en los métodos anteriores son válidas para el mag-coque, por lo que no se insiste en ellas. Resumiendo, se puede decir que la proporción de adición de mag-coke depende de:

- Contenido de azufre del hierro base.
- Magnesio residual previsto o deseado.
- Temperatura del metal durante el tratamiento.

En la figura 79 se muestran, para diversas temperaturas de tratamiento, las cantidades de mag-coke necesarias para obtener un 0,050% de magnesio residual en función de los contenidos de azufre y temperatura del hierro base.

Según sus promotores, las ventajas del proceso mag-coke son las siguientes:

- No se necesita desulfurar, con lo que el tiempo de manipulación es menor, se reducen los costos globales y las pérdidas de temperatura.
- Al disminuir la violencia de la reacción a lo largo del tiempo, la absorción del magnesio por la fundición es más fácil, segura y constante, obteniéndose buen grado de recuperación de magnesio y una esferoidización correcta.
- Sólo se adiciona magnesio, con lo que no se altera indeseablemente la composición original del hierro base, a diferencia de otros procesos en los que el magnesio va acompañado de otros elementos (Ni, Al).
- Esta ventaja lleva a otra subsidiaria, cual es la de po-

der emplear un elevado porcentaje de retornos de nodular en la carga fría del horno de fusión.

- Se produce menos escoria, y ésta es más fácil de manipular, con las ventajas que de ello se derivan.
- Finalmente, no se añade aluminio con la ferroaleación, evitándose así la aparición de defectos de “pinhole”.

#### 6.2.13. Proceso MAP

El proceso Pont-a-Mousson o MAP es una variante de los procesos de inmersión que implica el empleo de barras o lingotes de magnesio puro protegidos por una capa de refractario. Esta tecnología se empleó en la Glamorgan Pipe Division de Amsted para fabricar tubos centrifugados de fundición con grafito esferoidal.

Como se ha dicho, el material de tratamiento es un lingote de magnesio puro. En el extremo de un bloque de magnesio, pesado previamente, se colocan uñas de cemento endurecido y se sujetan con dobles vueltas de alambre. A continuación se pinta el bloque de magnesio con tres capas de barro refractario bien secado al aire. En el fondo se deja una pequeña superficie sin recubrir para que se inicie la reacción. El bloque se monta en el extremo de una barra y se sumerge en la fundición líquida.

Cuando se sumergen, los lingotes deben estar limpios y libres de grasas o aceites. La película de refractario no debe desprenderse o agrietarse en las zonas planas ni en las esquinas, ya que de lo contrario se aceleraría la reacción entre el magnesio y el caldo con el consiguiente riesgo de explosiones.

La cantidad de caldo en la cuchara, para posterior colada de tubos, suele ser de unas 5 toneladas de hierro base, con aproximadamente 2,35% de silicio, previamente desulfurado hasta quedar en 0,010% S. Las cucharas y tapas de cucharas se construyen en chapa de 15 – 20 mm de espesor y van reforzadas con nervios verticales y circulares para resistir la presión hacia fuera del vapor de magnesio en el caso de una explosión. Los equipos auxiliares de tratamiento constan de un carro de cuchara y una tapa que lleva anexa la campana de inmersión movida y sujeta en su posición durante el tratamiento mediante un sistema hidráulico. El método de operación se desarrolla como sigue:

1. Se coloca un bloque de magnesio, previamente revestido con refractario, en la campana de tratamiento y se sujeta mediante alambres a una varilla de acero de 5 – 10 mm, varilla que está mantenida en posición mediante los agujeros laterales de la campana de inmersión.

2. El carro porta-cuchara se desplaza hasta quedar situado bajo la vertical de la campana de

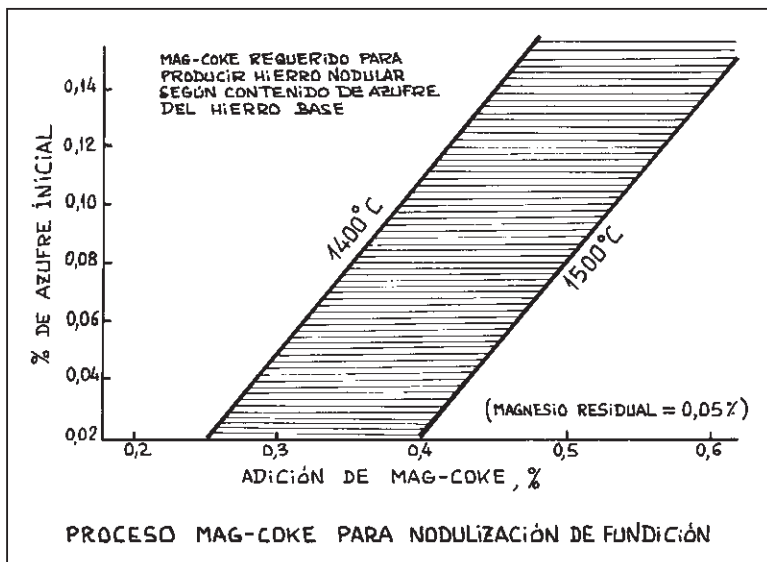


Figura 79.

inmersión. Se efectúa el tratamiento, si es para tubos, a unos 1350 °C.

3. Se sumerge el magnesio en la fundición líquida y se trinca la tapa en su posición mediante el empujador hidráulico. El tiempo de reacción es de 45 a 50 segundos, aunque puede ser más rápida en algunos casos. Hay que prever que el fogonazo de la contrapresión que tiende a levantar la tapa es considerable.

La recuperación de magnesio es del 50 al 60% a 1.350 °C, pero declina rápidamente con el aumento de temperatura y así, a 1.375 °C, se queda en 35 a 40%. La cantidad tratada es también importante y es preferible que pase de las 3 toneladas para lograr un buen coeficiente de recuperación de magnesio. Por ello puede decirse que el proceso MAP es adecuado (y así ha sido) para los tratamientos masivos a baja temperatura y para los casos en que las variaciones en el grado de recuperación de magnesio no son críticas. Un ejemplo clásico lo constituyen los tubos centrifugados de fundición con grafito esferoidal.

#### 6.2.14. Nodulización con encapsulados

##### 6.2.14.1. Introducción

En los últimos tiempos el empleo del encapsulado (también llamado "hilo de magnesio" o "cored wire") se ha difundido ampliamente entre las industrias

siderúrgicas de todo el mundo, tanto de acería como de fundición de moldeo. Esto se ha debido, principalmente, a la puesta en evidencia de los beneficios metalúrgicos que se derivan del empleo del encapsulado para operaciones tales como desoxidación, desulfuración y microaleación. Ha de tenerse en cuenta que cuando se añaden algunos metales o aleaciones a la fundición líquida aparecen problemas en la incorporación de ellos al baño de bidos, principalmente, a:

- Bajos puntos de fusión y ebullición de los aleantes.
- Elevada presión de vapor de estos elementos.
- Densidad diferente a la del baño férrico.
- Afinidad del aleante por el oxígeno y azufre.
- Tendencia a formar polvo reactivo.

Estas propiedades negativas dan lugar, a su vez, a circunstancias desfavorables como:

- Reacción violenta, incluso peligrosa.
- Escaso e inconsistente grado de recuperación de elementos.
- Posible formación de inclusiones no metálicas.
- Problemas medioambientales y de salud.

La utilización creciente de los encapsulados responde a

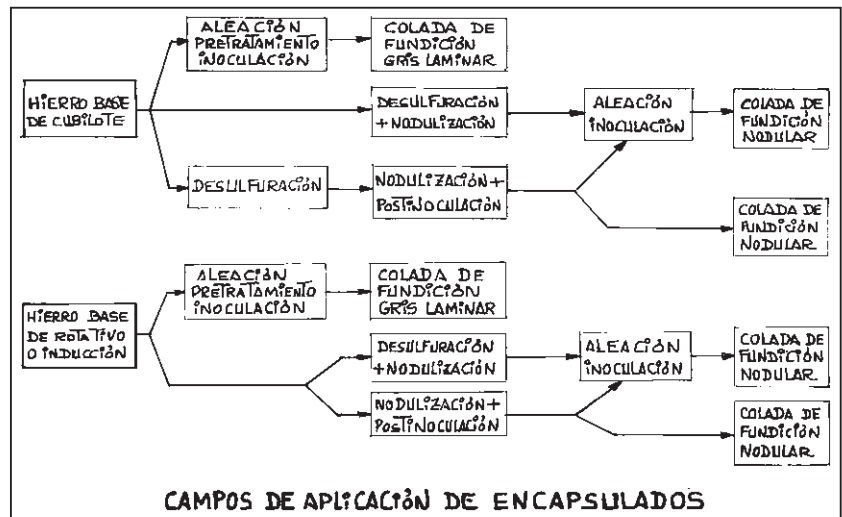


Figura 80.

estos retos. Los aspectos específicos de aplicación vienen condicionados por el elemento aleante y el equipo inyector empleado, de forma que aún se siguen investigando nuevas ideas y avances.

#### 6.2.14.2. Campos de aplicación

En el momento actual la tecnología del encapsulado se ha aplicado a diversas operaciones unitarias de la fabricación de fundiciones. Por ejemplo:

- Desulfuración.
- Tratamiento con magnesio.
- Incorporación de aleantes.
- Inoculación y post-inoculación.
- Recarburación.

Estas operaciones pueden realizarse aislada o simultáneamente y el proceso empleado dependerá de las características del hierro base de partida y de la calidad de la fundición que se desea obtener. Los cuadros de la figura 80 resumen el espectro de aplicaciones en taller de fundición. La gama de productos utilizables en estas aplicaciones es muy amplia y, entre otros, aparecen:

- Aleantes, pretratadores, inoculantes:  
Fe Cr, Fe Mo, Fe V, Cu, Ni, Sn, Si C, C (grafito), Fe Si, Fe Si Ca, Fe Si Sr, Fe Si Ba, Fe Si Ba Zr, Fe Si Mn Zr, Fe Si Bi, inoculantes de desvanecimiento lento.
- Desulfurantes:  
Ca C<sub>2</sub>, Ca C<sub>2</sub> - Na<sub>2</sub> C O<sub>3</sub>, Ca C<sub>2</sub> - Mg, Mg Ca, Mg.
- Nodulizantes:  
Mg y sus aleaciones, Ce, La, tierras raras (RE).
- Postinoculantes:  
C (grafito), Si C, Fe Si, inoculantes de desvanecimiento lento.

(Continuará)

## PRÁCTICA DE FUNDICIÓN: FABRICACIÓN DE FUNDICIÓN NODULAR (Parte 10)

*José Luis Enríquez  
Enrique Tremps*

### 6.2.14.3. El magnesio como nodulizante

En el año 1948, Morrough y Williams publicaron sus trabajos sobre la obtención de fundición con grafito esferoidal mediante adición de cerio metal a la fundición líquida. Un año después, Gagnebin y otros obtuvieron este mismo material por tratamiento con magnesio, según un proceso que fue patentado por la International (Mond) Nickel Company. En las patentes se expresa que debe quedar por lo menos 0,040% de magnesio ("magnesio residual") en la fundición para conseguir que todo el grafito quede en forma esferoidal y obtener, además, las mejores características mecánicas en bruto de colada. En los distintos procesos surgidos a lo largo del tiempo se ha empleado magnesio puro, ferroaleaciones de este elemento o formas físicas de protegerlo como, por ejemplo, el mag-coke visto en capítulo anterior.

Ya se ha mencionado que la nodulización del magnesio está condicionada por las propiedades físico-químicas de este metal, como son:

- Punto de ebullición 1.117 °C, muy inferior a los 1.400 - 1.500 °C que es el intervalo habitual de temperaturas del hierro líquido en las fundiciones.
- La presión de vapor alcanza 8 atmósferas a esas temperaturas.
- La solubilidad en la fundición es muy baja.
- Densidad 1,7 g/cm<sup>3</sup>, muy baja en comparación con los 7 g/cm<sup>3</sup> del hierro líquido.
- Gran afinidad con el oxígeno y azufre.

La desviación estándar de los procesos es bastante elevada en algunos casos, lo que se traduce en falta de consistencia y, por ende, cantidad importante por rechazos. Estas circunstancias desfavorables condicionan perjudi-

cialmente el proceso de adición de magnesio para obtención de fundición nodular, apareciendo las siguientes dificultades:

- Los rendimientos con los que se trabaja son realmente bajos, no sobrepasando el 40% en la mayoría de los procesos.
- Como se mencionó en el epígrafe anterior, la adición de magnesio conlleva una reacción que puede llegar a ser pirotécnica, con emisión abundante de luz y humos.
- Cuando la adición de magnesio se hace sobre la superficie del baño se precisa una fuerte agitación homogeneizadora, que suele hacerse por insuflado de gases argón o nitrógeno con lanza o tapón poroso.
- Los métodos convencionales de adición de magnesio presentan problemas sustanciales cuando la operación se efectúa en cucharas con cantidades grandes de fundición líquida.

Es grande el número de procesos esferoidizadores que han aparecido a lo largo del tiempo de existencia de la fundición nodular. La reacción pirotécnica que conlleva la producción de fundiciones nodulares, ha planteado problemas de control de proceso a los técnicos responsables de las fundiciones. Los procedimientos convencionales ya se han estudiado anteriormente es esta revisión. La mayoría se basan en la colocación del magnesio o sus aleaciones en el fondo de la cuchara, seguida de colada del caldo sobre ella. Este proceso tiene algunas variantes, la más sencilla de las cuales consiste en depositar la aleación a un lado de la cuchara y cubrirla con desperdicios de acero. Hay otras modalidades, algunas de las cuales ya se han revisado anteriormente, como:

- Método Sandwich, desarrollado por la Ford Motor Company, de Cleveland, (USA), con la aleación en el

fondo de cucharas especiales. Hay una variante Dec-  
kel de este proceso.

- Método Trigger, desarrollado por la Corporación Meehanite, en el que la aleación se protege de la flotación prematura mediante carburo cálcico que se caramelize o vitrifica a la temperatura de la fundición líquida.
- Pre-Packing (Precargado), con la aleación nodulizante protegida en un tubo de acero o nodular.
- Sobretratamiento-dilución, desarrollado por Gebrüder Sulzer, de Schaffhausen (Suiza).
- Mag-Coke, o coque impregnado de un 40 - 50% de magnesio.
- Overpouring, adecuado para tratamientos frecuentes y periódicos de cucharas con 1,5 a 3 toneladas de caldo. Desarrollado por Dow Chemical International.

Hay otros métodos, en los que el magnesio o su aleación son forzados a penetrar en el caldo:

- Uno de ellos, adaptable a la piqueta del cubilote, es el T-Nock; la fundición pasa a través de una tobera de material refractario de manera que se forme un chorro hueco, en cuyo interior se vierte la aleación en polvo.
- Por gravedad, que es una variante del anterior, con una tolva y alimentador vibratorio.
- Inyección, utilizando lanza de grafito y nitrógeno seco o CO<sub>2</sub> seco como gas portador. El proceso se suele combinar con desulfuración con carburo cálcico y recarburación con grafito.
- Inmersión por campana ("Plunging") que permite emplear magnesio puro. La campana, de material refractario o grafito, es solidaria de una pesada tapa que cubre la cuchara durante el tratamiento, para impedir las proyecciones resultantes de una reacción violenta.
- Convertidor Fisher, perfeccionado en la antigua Unión Soviética. El magnesio puro se deposita en un alvéolo situado en el fondo de una cuchara hermética que se voltea, con lo cual el magnesio queda cubierto por todo la masa de caldo. El cierre hermético, en combinación con la presencia de argón, compensa la presión de vapor del magnesio.

Finalmente, hay procedimientos que realizan la nodulización en la corriente de caldo:

- El Flotret efectúa el tratamiento en un recipiente intermedio especialmente diseñado.
- El Inmold lo hace en una cavidad dispuesta en el sistema de llenado de todos y cada uno de los moldes a colar.

Los procesos más difundidos en el momento actual son:

- Overpouring y sus variantes.
- Sandwich.
- Campana de inmersión (Plunging).

- Convertidor Fisher.
- Inmold.
- Flotret (y Flow-Through).

Cada uno de estos sistemas puede presentar diversas ventajas en función de las condiciones prevalecientes en cada taller de fundición. Todos ellos implican la introducción, en el baño de fundición, de magnesio, bien puro o bien aleado con cerio y otros elementos o compuestos de metales del grupo de las tierras raras. En la mayoría de los casos, el tipo de material de tratamiento influye grandemente en la factibilidad y eficiencia del procedimiento. La práctica de fusión es también un factor determinante a la hora de escoger el método de tratamiento a implantar en cada taller. Los fundidores evalúan los métodos de tratamiento, la cantidad de magnesio y otros componentes necesarios para garantizar fiabilidad en el grado de nodulización, así como la adecuación del proceso para producir hierro nodular a la temperatura y calidad requeridas en función del tamaño y tipo de piezas a fabricar con ese material.

Además de magnesio puro, el fundidor dispone, como ya se ha visto, de una gran variedad de aleaciones portadoras de magnesio, en función del equipo disponible, método de nodulización, cantidad individual a tratar, temperatura de la fundición y parámetros metalúrgicos, todo ello de acuerdo a las aplicaciones a cumplimentar. La Tabla 4, que se presentó en el capítulo anterior, aporta un resumen comparativo de características básicas de algunos procedimientos convencionales de tratamiento nodulizador. Ha de tenerse en cuenta que todos los procesos basados en el empleo de magnesio elemental o metálico requieren la implantación de un equipo complejo y de alto costo. Dicho en otras palabras, cuanto menor es el precio de la unidad elemental de magnesio añadido, mayor resulta ser el costo del equipo puesto en juego, más sofisticado es el proceso y mayor dificultad reviste su operación.

#### 6.2.14.4. Nodulización con encapsulado ("hilo de magnesio")

El fundidor conoce los beneficios desulfuradores que se obtienen mediante el tratamiento de la fundición con productos alcalinos o alcalinotérreos como son, por ejemplo, el carbonato sódico o el carburo de calcio; también es consciente de los problemas de manipulación de escorias que este tratamiento conlleva. El empleo de encapsulado conteniendo magnesio o aleaciones de calcio y magnesio para la realización de la desulfuración evita la aparición de estos problemas. Como se ha visto en el capítulo anterior, el encapsulado es aplicable a utilizaciones muy amplias. De las que tienen relación con la fundición nodular las más interesantes son desulfuración, esferoidización y postinoculación, que pueden adaptarse a caldos obtenidos en todo tipo de hornos como:

- Crisol basculante, prácticamente en desuso.



- Reverbero, sustituido por el rotativo o los de inducción.
- Rotativo, en combinación con quemadores oxi - gas.
- Cubilote, duplexando con hornos de inducción.
- Eléctrico de arco, desplazado por los de inducción.
- Inducción (crisol o canal), los más utilizados.

Se pueden tratar fundiciones líquidas de contenidos de azufre comprendidos entre 0,005 y 0,100%. También es muy adecuado el hilo de magnesio para la obtención de fundiciones con grafito compacto para las cuales, como es sabido, es fundamental trabajar con unas relaciones Mg / S consistentes y reproducibles, pretensión difícil de alcanzar con procesos convencionales. Abundando en la aplicabilidad de esta tecnología, se tratan cucharas desde sólo 150 kg de capacidad hasta 25 toneladas o más, a temperaturas que oscilan entre 1.320 y 1.580 °C.

El método se basa en la adición de magnesio puro o sus aleaciones directamente al fondo de la cuchara que contiene el metal a tratar. Para ello se introduce el producto protegido por un tubo elaborado con fleje de acero ribeteado. Éste evita su fusión prematura y posibilita su introducción hasta el fondo de la cuchara. La fusión del producto en el fondo hace que las burbujas de magnesio vaporizado tengan que atravesar una larga columna de caldo antes de llegar a la superficie, lo que favorece su digestión por el metal, mejorando así el rendimiento y haciéndolo repetitivo.

#### 6.2.14.5. Equipos y productos empleados

##### 1) Estación de tratamiento:

La estación de tratamiento, tal como se aprecia esquemáticamente en las Figuras 81 y 82, consta de una estructura que soporta la máquina inyectora con su bobina de alimentación de hilo, el sistema extractor de humos (no representado en las figuras) y la tapa de protección contra salpicaduras a través de la cual pasa el tubo-guía del encapsulado ("hilo") y el propio hilo. Debajo de la plataforma está el alojamiento posicionador de la cuchara (también sin representar) y su sistema de cierre de

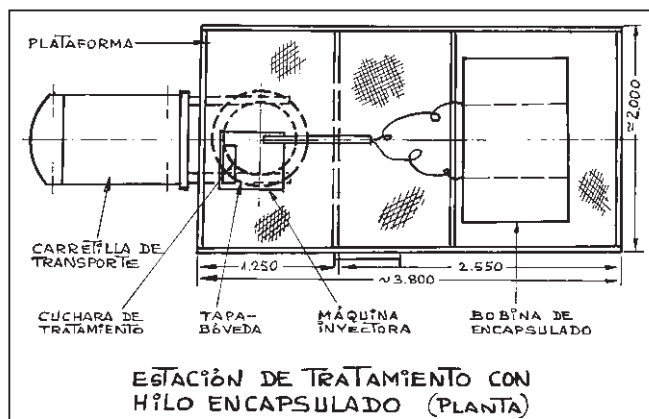


Figura 81.

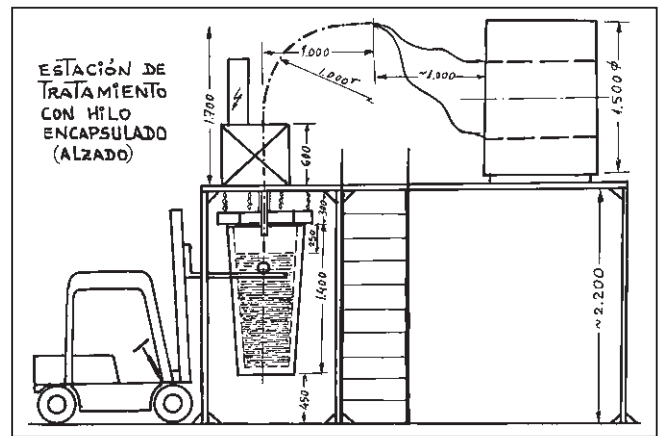


Figura 82.

atmósfera, si lo hay. A un lado de la plataforma, o debajo de ella, se encuentra la unidad PC de control. Todo ello a la medida de las circunstancias específicas de cada taller, especialmente en lo que tiene que ver con el movimiento de cucharas, con vistas a optimizar los resultados operativos y técnicos del mismo.

Desde el punto de vista de diseño de la estación de tratamiento es preciso tener en mente que hay dos tipos básicos de máquinas inyectoras. En uno de ellos el movimiento del hilo previo a la inyección se efectúa verticalmente, mientras que en el otro la admisión y salida del hilo en la máquina se hace según trayectoria horizontal. El primer tipo, vertical, parece ser el más adecuado para el trabajo en fundiciones. Su disposición se esquematiza en la Figura 83. En

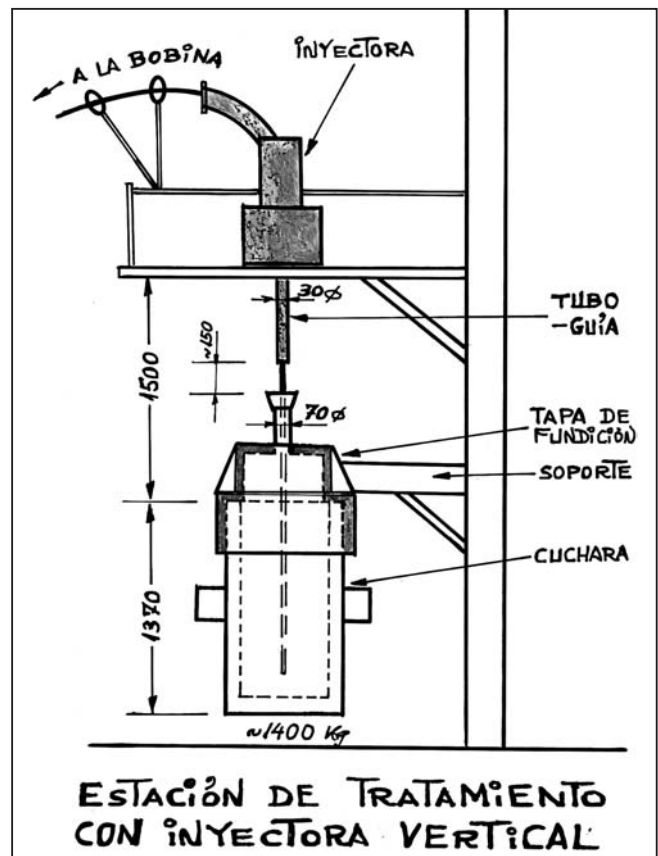


Figura 82.

lo que sigue se presentan ideas que responden a circunstancias específicas de cada taller en concreto:

En el esquema de la Figura 84 la carretilla de transporte ("toro") coloca la cuchara en los salientes de fijación del posicionador-elevador. A continuación, una vez retirada momentáneamente la carretilla, este posicionador, accionado eléctrica o hidráulicamente, eleva la cuchara hasta apretarla contra la tapa o bóveda situada encima. Después se cierran las persianas o puertas de aislamiento (si las hay) y se conecta la aspiración de humos (si la hubiera también) y se pone en marcha la máquina inyectora. Los movimientos que siguen son iguales y de sentido contrario a los descritos.

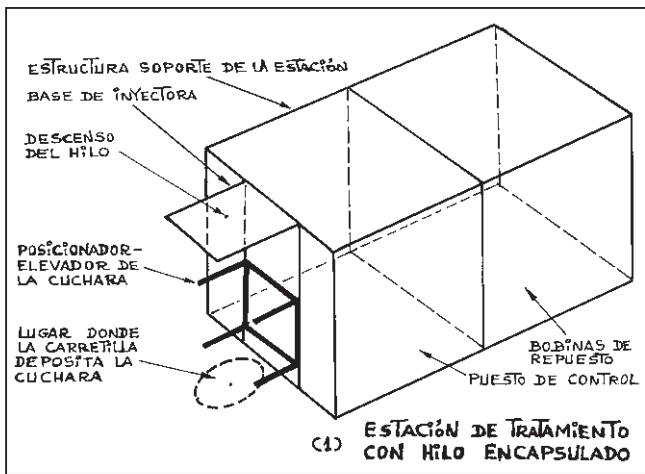


Figura 84.

En la solución representada en la Figura 85 no hay carretilla que transporte la cuchara. Ésta es llevada por el puente grúa que la deja sobre un carro-transfer circunlando sobre raíles, que puede desplazarse manualmente (cucharas pequeñas) o mecánicamente hasta dejar la cuchara sujeta en el posicionador. Si éste es fijo será la tapa la que descienda mediante el mecanismo correspondiente. Si el posicionador tiene elevación-descenso mecánica la tapa puede ser inmóvil. El resto de operaciones es como en el ejemplo anterior.

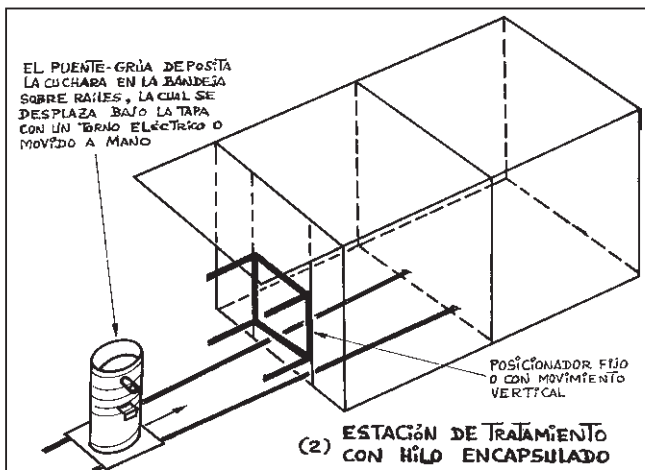


Figura 85.

La disposición mostrada en la Figura 86 es una variante del caso anterior en la que se ha modificado la forma del carro-transfer. Esta modificación implica la necesidad de que la tapa sea ahora la que cuente con mecanismo de elevación y descenso. El puente grúa o monorraíl introduce la cuchara en el alvéolo posicionador del carro-transfer que se desplaza manual o mecánicamente hasta dejar la cuchara en la posición de tratamiento, en la que se realiza el resto de las funciones. No hay posicionador, ya que la cuchara queda fijada por el fin de carrera del propio carro transfer.

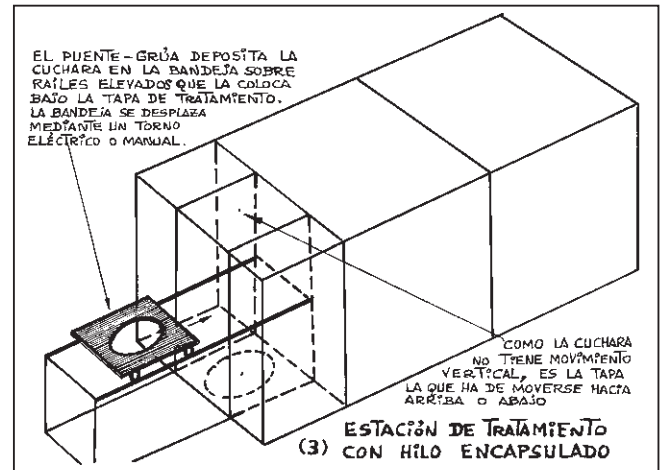


Figura 86.

En la Figura 87 se ve que la cuchara es transportada por puente grúa o monorraíl haciendo uso del balancín mostrado en detalle en la Figura 88. Este balancín ha de tener una anchura suficiente para poder introducir la cuchara bajo la vertical de la máquina inyectora. La plataforma ha de ser, lógicamente, más estrecha en la zona de la máquina inyectora a fin de que el balancín no tenga tanta anchura que pierda rigidez estructural y seguridad de maniobra. Dado que la cuchara está permanentemente suspendida del puente grúa no se precisa ningún equipo de elevación-descenso en el posicionador de la misma ni en la tapa, lo que simplifica el sistema. En las Figuras 89, 90 y 91 se representa una va-

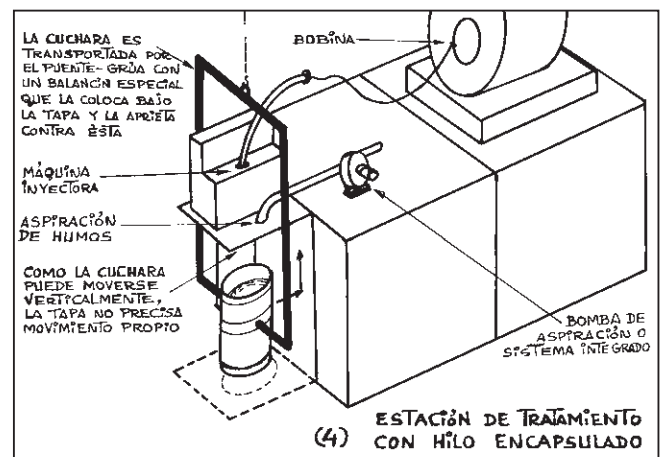


Figura 87.

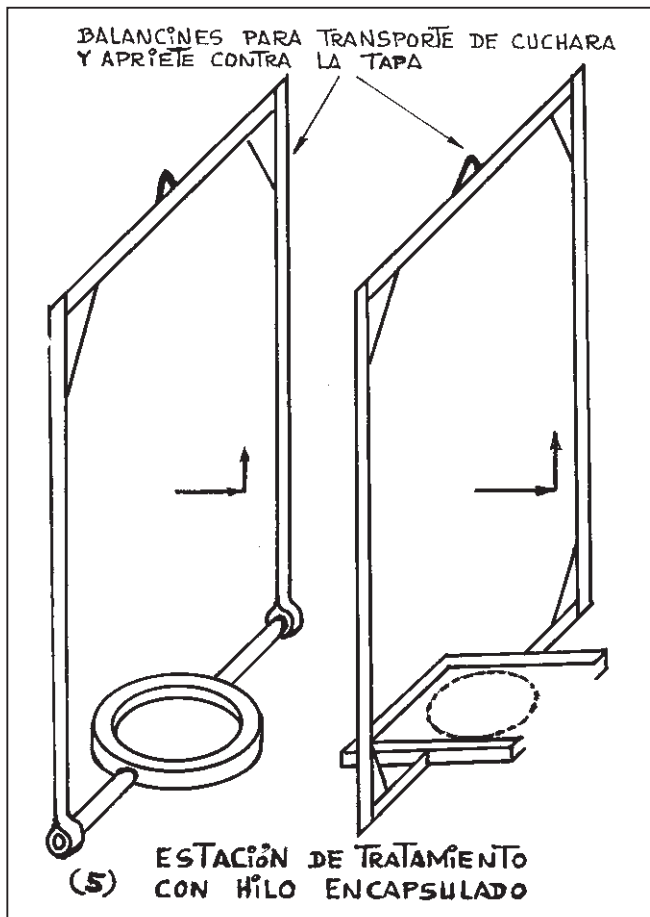


Figura 88.

riante de la solución anterior en la que se modifica ligeramente el diseño del balancín. El resto del equipo y el modo de operación son sensiblemente iguales.

En la solución vista en las Figuras 92 y 93 el puente grúa cuelga la cuchara del carrito y gancho (sin polipasto elevador) de un pescante o pluma oscilante que gira y la coloca, controlando mediante un tope o fin de carrera, en la posición de inyección. El mecanismo de ascenso - descenso de la tapa de cierre hace bajar ésta sobre la cuchara, efectuando el cierre de atmósfera. Una vez efectuado el tratamiento nodulizador se eleva la tapa, con lo que la cuchara queda libre para ser extraída, mediante giro de la

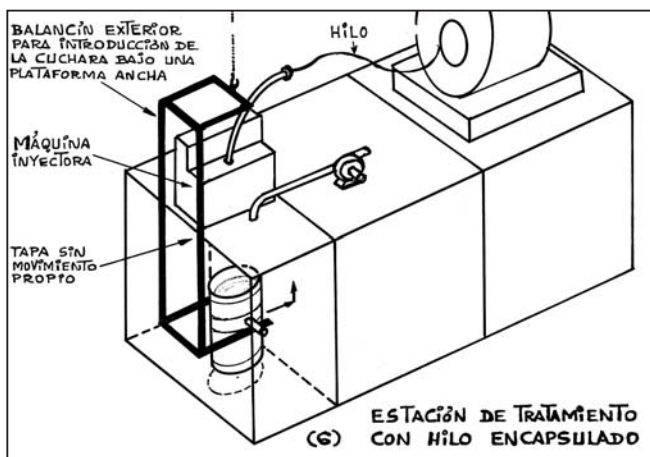


Figura 89.

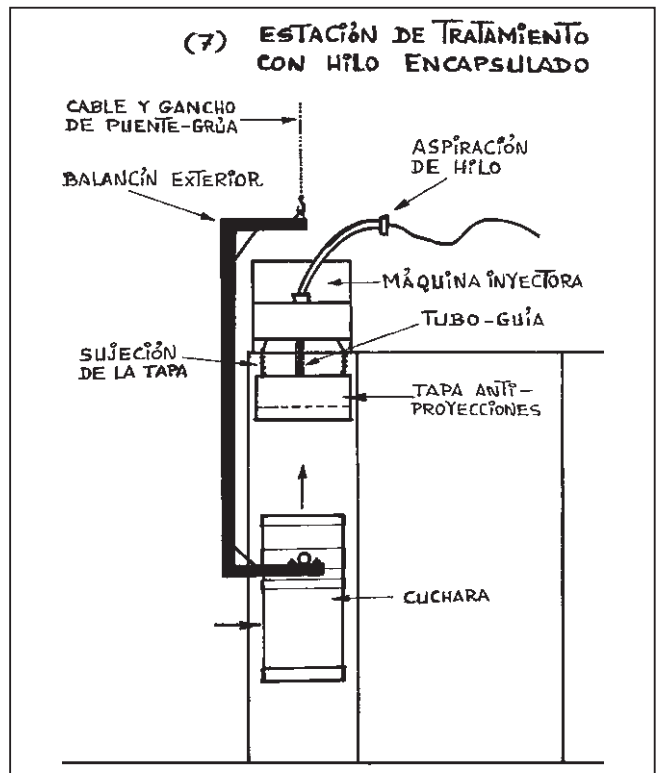


Figura 90.

pluma, hasta quedar al alcance del gancho del puente grúa que la lleva hasta la zona de inoculación y colada.

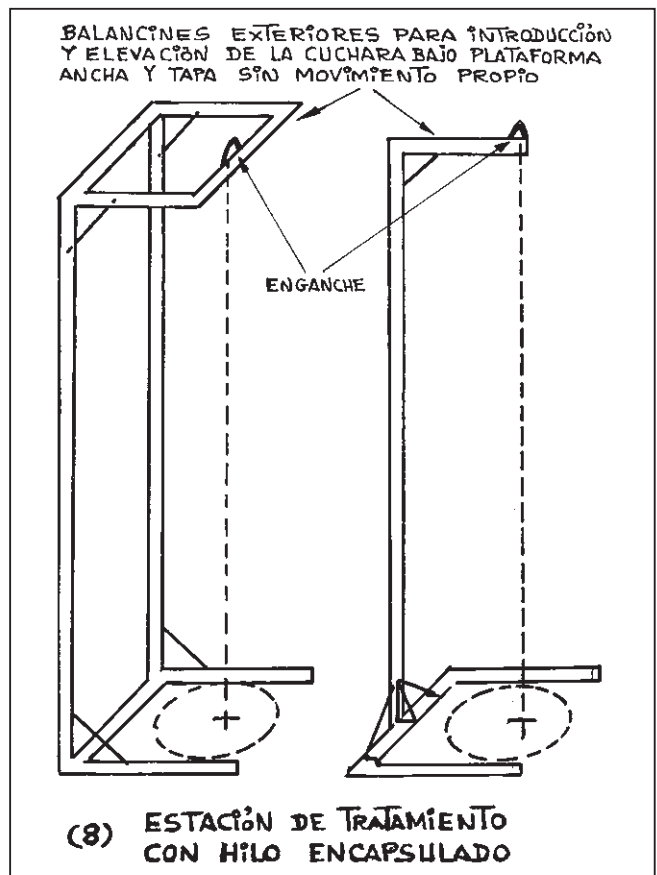


Figura 91.

(Continuará)

## PRÁCTICA DE FUNDICIÓN: FABRICACIÓN DE FUNDICIÓN NODULAR (Parte 11)

José Luis Enríquez  
Enrique Tremps

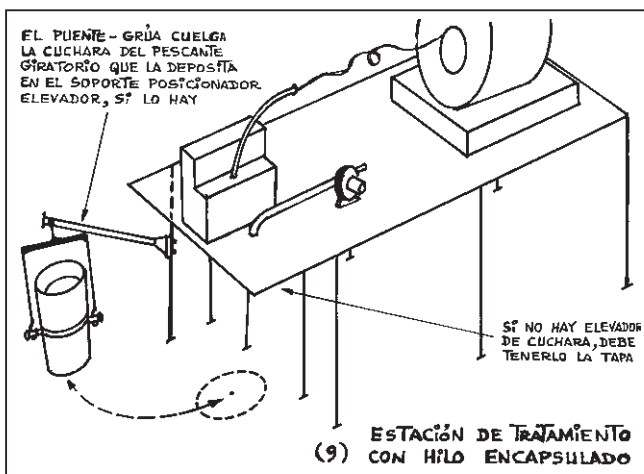


Figura 92.

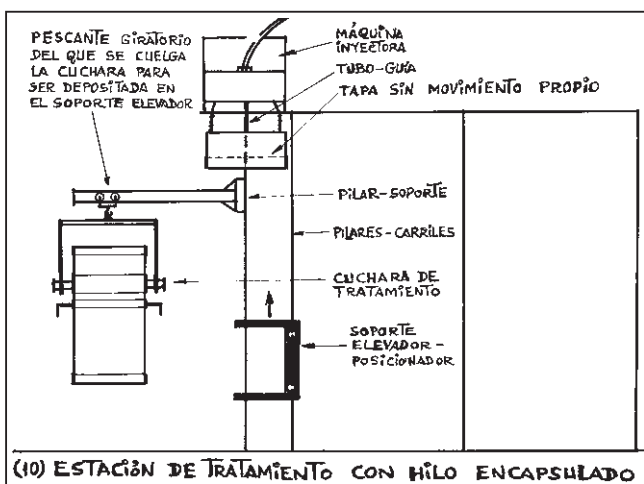


Figura 32.

Las estaciones con máquinas horizontales suelen utilizarse en aquellos casos en que debido al gran tamaño de las cucharas o al sistema de transporte empleado no es

posible situar la máquina sobre la vertical de las mismas. Son muy adecuadas, por ejemplo, para metalurgia secundaria de acería (también llamada "metalurgia en cuchara") ya que en este sistema se evita el calentamiento radiante transmitido a la máquina por la presencia bajo la plataforma de cucharas con grandes cantidades de acero líquido, normalmente de 100 a 300 toneladas. La Figura 94 ilustra un montaje para nodulización de fundiciones.

### 2) Máquina inyectora

Las Figuras 95 y 96 representan esquemas de máquinas, vertical y horizontal respectivamente, fabricadas por Talleres Coruñeses. Básicamente se trata de dos líneas enfrentadas de rodillos. Los de una línea son móviles, pudiéndose aproximar a los otros dos de la contraria mediante un accionamiento eléctrico o neumático. Esto permite la utilización de la misma máquina con hilos de diferente diámetro (5 - 13 mm). Un motor eléctrico de 3 kW de potencia provoca la rotación de los rodillos mo-

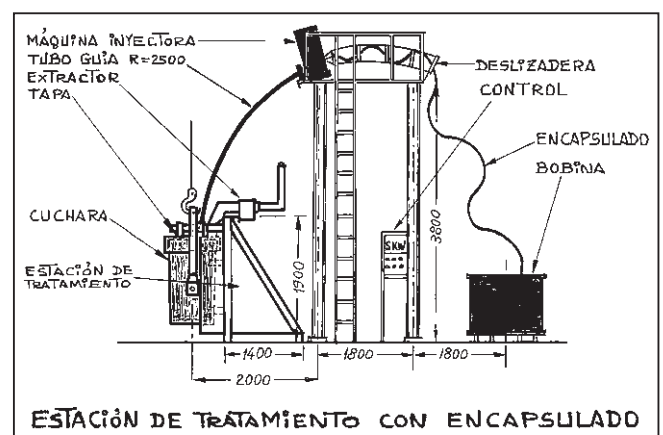


Figura 94.



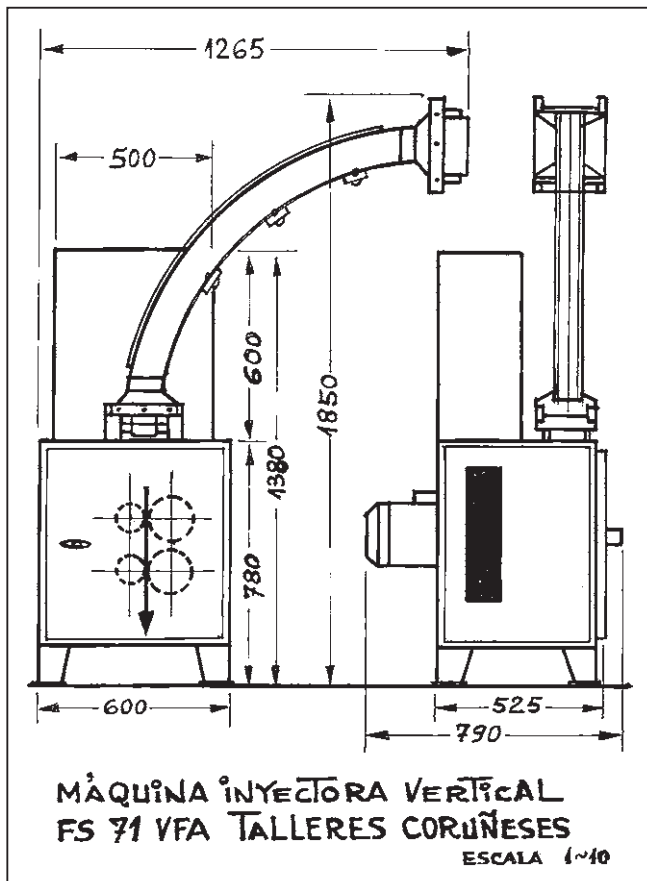


Figura 95.

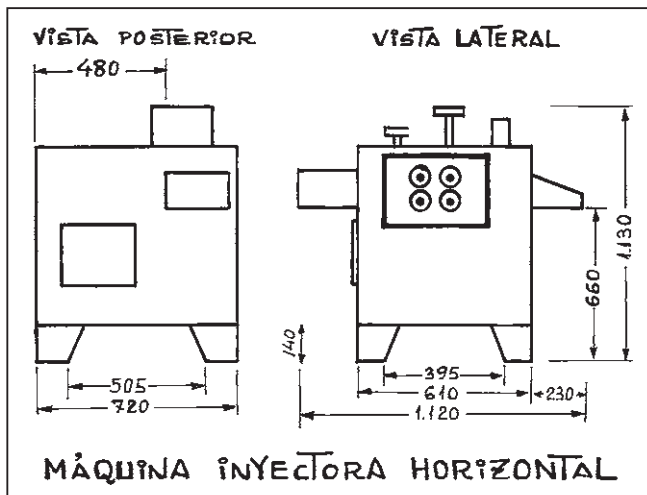


Figura 96.

tores. En el primer rodillo se coloca un sensor que genera la señal para el tacómetro.

La velocidad de rotación de los rodillos, y por tanto la de inyección del hilo, se regula mediante un variador de frecuencia, permitiendo en general la inyección a una velocidad lineal de 10 a 70 m/min. El funcionamiento de la máquina, dejando a un lado un interruptor general, se controla desde una consola de mando a distancia con pantalla táctil gobernada por PLC o desde un PC. Las máquinas más sencillas tienen una sola línea o tren de rodillos y su función es sólo de nodulización. Hay otro tipo de

máquinas, que cuentan con dos líneas dentro de la misma unidad. De ellas, una trabaja inyectando el nodulizante mientras la otra introduce la ferroaleación post-inoculadora; esto permite realizar secuencialmente las dos actividades en la misma estación y sin trasladar la cuchara.

### 3) Tubo - guía

Su función es dirigir el hilo hasta su entrada en la cuchara. En el caso de las máquinas de inyección horizontal el tubo realiza el guiado del hilo con la curvatura adecuada para asegurar la penetración vertical en el caldo. Hay que evitar que el hilo, a su salida del tubo, describa una dirección que le lleve a chocar con las paredes de la cuchara. El diámetro del tubo-guía es aproximadamente de 30 - 50 mm, según características de hilo y cuchara.

En la Figura 97 se muestra la disposición de un tubo-guía curvo adaptado a una máquina inyectora de trabajo horizontal, así como los movimientos que realizan tapa y cuchara para su ubicación en la posición de tratamiento. En la Figura 98 se tiene un tubo guía curvo, pivotante y articulado, que facilita los movimientos de la cuchara cuando está suspendida de un puente grúa o monorraíl.

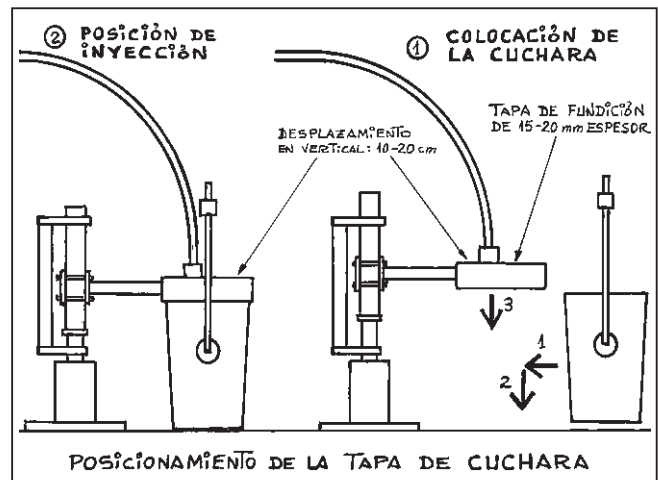


Figura 97.

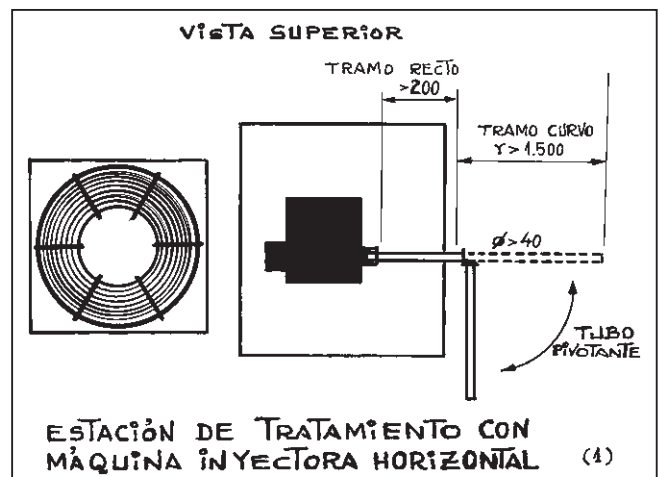


Figura 98.

En las Figuras 99, 100, 101 y 102 se tienen estaciones con tubo guía curvo, adaptadas a disposiciones específicas de las bobinas de encapsulado.

4) Tapa de cuchara

Es una pieza fundamental en la instalación de nodulización. No sólo evita proyecciones y salpicaduras y facilita

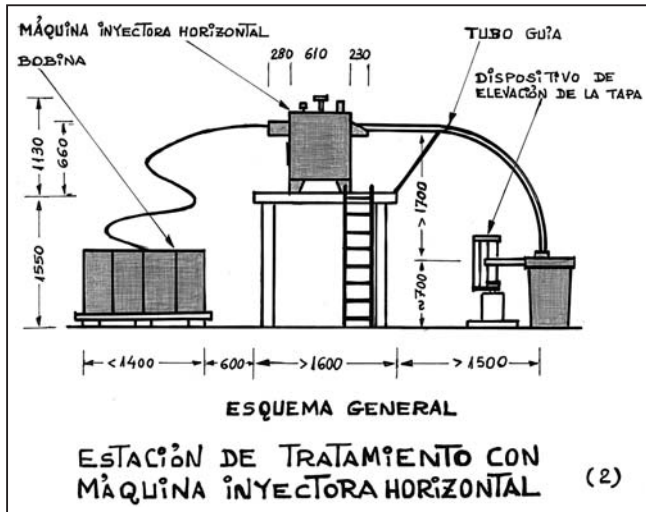


Figura 99.

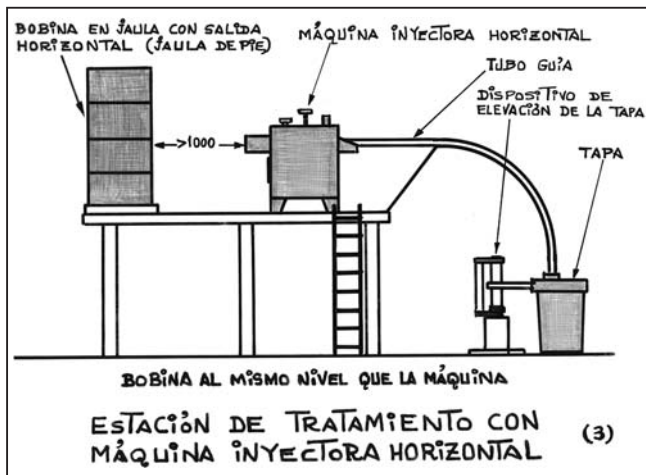


Figura 100.

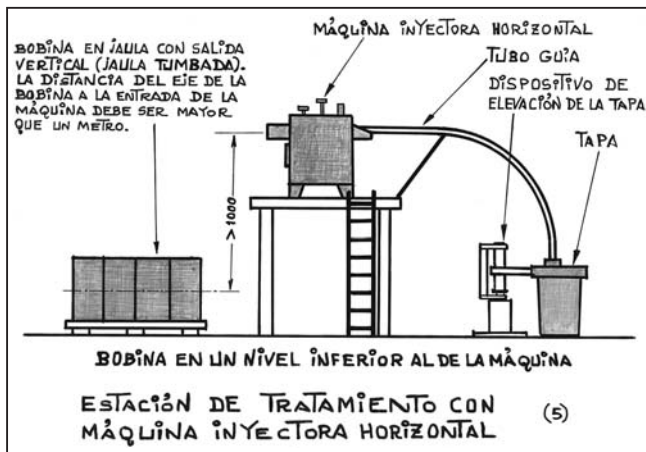


Figura 101.

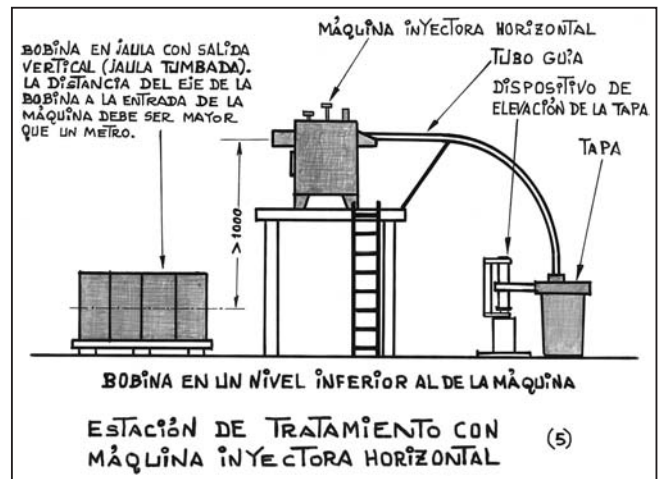


Figura 102.

la aspiración de los gases generados, sino que contribuye a alcanzar buenos rendimientos y reduce la desviación estándar del proceso. En la Figura 103 se contempla la disposición de la tapa en el conjunto del sistema de tratamiento.

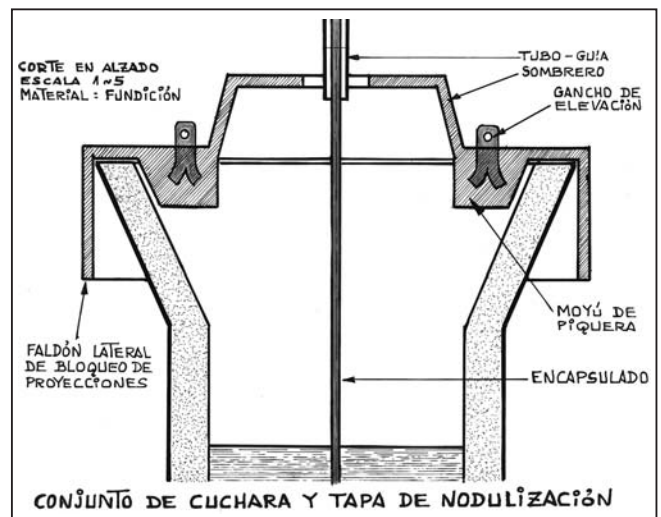


Figura 103.

Puede ser de chapa de acero (en cuyo caso debe estar revestida de refractario) o moldeada. En este último caso, y para evitar la deformación térmica inherente al acero, es de fundición, 20-40 mm de espesor, y con un diseño y material que la hagan indeformable frente al calor irradiado por la cuchara. Es conveniente dar una capa de pintura refractaria en su cara interior para facilitar el despegue y arranque de las proyecciones de fundición y acreciones de escoria. El peso de la tapa puede ser suficiente para que cierre la unión con la cuchara durante la inyección.

La tapa tiene un tubo en su centro con el objeto de dirigir el hilo en una dirección perfectamente vertical y centrada con el eje de la cuchara. Aún mejor es que este tubo tenga un embudo en su extremo superior. También puede haber una tubería o chimenea que se conecta al sistema de aspiración y depuración de humos, en el caso

de que no hubiera una aspiración global en la cabina de tratamiento. El diseño de la tapa puede variar en función de la geometría de la cuchara, a fin de garantizar una altura libre suficiente sobre el nivel de la fundición líquida que evite proyecciones que la inutilicen. Si la altura es insuficiente se recurre a tapa con sombrerete.

Operativamente, cuando se trabaja con una estación de tratamiento, la tapa de la cuchara forma parte integral de ella, y cuenta con un dispositivo de elevación y descenso. En lugar de realizar engorrosas operaciones para colocar y quitar la tapa, ésta permanece fija, disponiendo únicamente de movimiento ascendente - descendente. La cuchara puede llevarse bajo la vertical de la tapa por diversos medios de transportes: carretilla transportadora, carretón motorizado sobre raíles (sobre el suelo o elevados), puente grúa con balancín especial, pescante o pluma giratoria, etc. En el momento de realizar el tratamiento se coloca la cuchara, mediante su sistema de transporte, en el lugar fijado y se hace descender la tapa. Una vez finalizada la inyección se eleva para permitir la evacuación de la cuchara. El desplazamiento de la tapa es mínimo, comprendido entre 10 y 20 cm, lo imprescindible para que la entrada y salida de la cuchara se realice con facilidad y seguridad. En epígrafes y figuras anteriores se trató el asunto del movimiento de cucharas en función de las facilidades del taller, por lo que no se vuelve sobre ello.

### 5) Cuchara de tratamiento:

La única exigencia planteada a las cucharas por este proceso hace referencia a las dimensiones de las mismas. Se parte de la base de que la idea fundamental de este método es añadir el producto nodulizante directamente al fondo de la cuchara con el objeto de que las burbujas de magnesio formadas tengan que vencer y atravesar una columna alta de hierro líquido antes de llegar a la superficie, con lo que se facilita su digestión. Para hilos de magnesio puro (que son los más reactivos) son preferibles cucharas esbeltas, con una relación altura: diámetro igual o mayor que 2:1. Con unas cucharas tan esbeltas la columna ferrostática es más alta y el tiempo de residencia y contacto es mayor, alcanzándose mejores recuperaciones de magnesio y pérdidas de temperatura más reducidas.

Sea cual fuere la cantidad de fundición presente en la cuchara, la profundidad del baño no puede ser inferior a 50 cm, con otros 50 cm de franco bordo o altura hasta el borde de la misma. Las cantidades unitarias de tratamiento suelen estar comprendidas entre 0,5 y 1,5 toneladas, aunque se han llegado a realizar tratamientos por encima de las 20 toneladas. Las Figuras 104, 105 y 106 aportan ideas sobre forma y dimensiones de cucharas para nodulización con hilo. En lo que concierne a composición y características del revestimiento refractario de

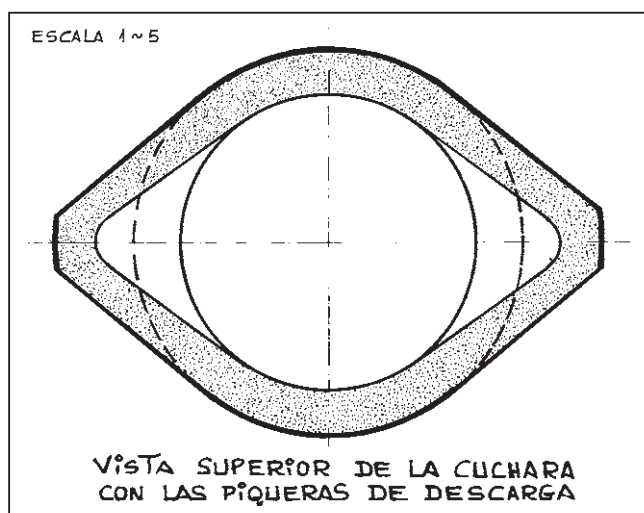


Figura 104.

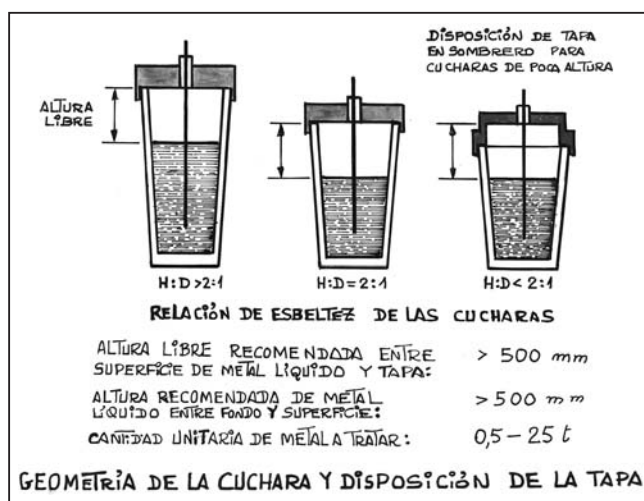


Figura 105.

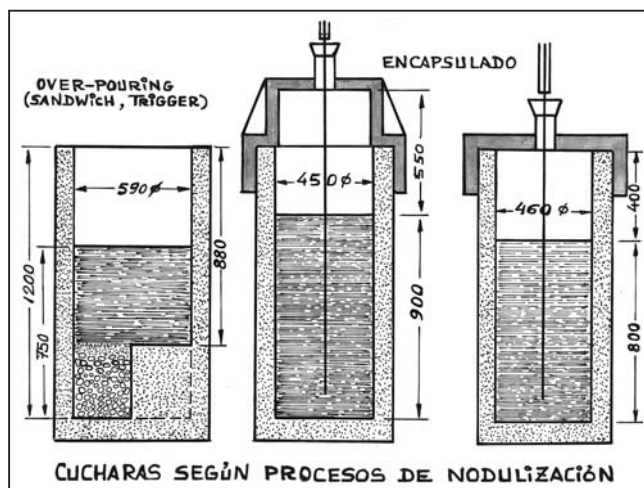


Figura 106.

las cucharas, se trató en capítulo anterior, por lo que no se vuelve sobre ello.

### 6) Hilo nodulizante (encapsulado):

El encapsulado se fabrica a partir de un fleje de acero que se curva mediante un sistema de rodillos hasta lograr



una forma sensiblemente cilíndrica. Durante el proceso de perfilado se adiciona el nodulizante magnesio, y en la fase final se efectúa el ribeteado del tubo asegurando un cierre correcto. La Figura 107 representa las características básicas del encapsulado según el uso al que vaya destinado (acería, fundición nodular, grafito compactado, inoculación...).

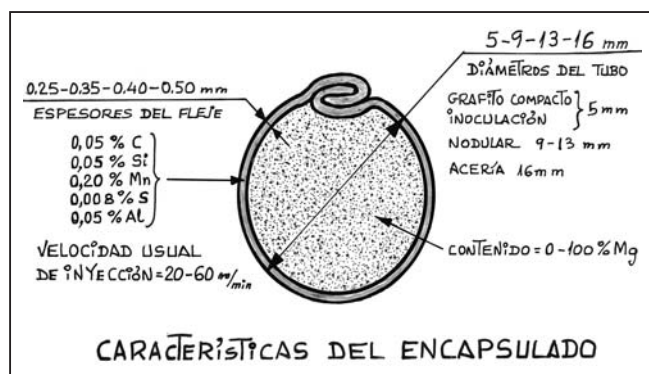


Figura 107.

Las bobinas tienen unas dimensiones aproximadas de 1.500 x 1.500 x 780 mm, con un diámetro interior de 750 o 1.000 mm. El diámetro exterior viene dado por la longitud de hilo pudiéndose hacer, si fuera preciso, bobinas de menor tamaño. Las bobinas completas de hilo de 13 mm tienen una longitud de hilo de unos 5.500 metros y las de 9 mm llegan a 10.000. El peso máximo en ambos casos es de 2.000 kg. La bobina está embalada en una jaula metálica desechable que permite el desenrollado desde el interior de la misma. Se presenta sobre palet para facilitar su manejo. Como se vió en figuras anteriores, y en función de la colocación de las bobinas respecto a la máquina de inyección, pueden modificarse algunas de sus características, como la salida horizontal o vertical y los diámetros específicos.

El producto nodulizante está compuesto básicamente de silicio, calcio, magnesio y cerio (tierras raras). El contenido de magnesio puede variar desde cantidades muy bajas hasta el 100%. El calcio combina varios efectos; además de ser elemento nodulizante, es un desulfurante muy potente, calma la reacción del magnesio, aumentando y estabilizando su rendimiento, y da lugar a una escoria de fácil separación. El cerio, y las tierras raras en general, mejoran la nodulización, evitando las influencias negativas de elementos como plomo, titanio, antimonio, arsénico, etc.

En cuanto al diámetro del tubo, se emplean 5 mm para producir fundición con grafito compacto y para inoculación en general. Los diámetros más empleados para nodulizar son 9 y 13 mm quedando el de 16 mm para metalurgia secundaria de acería. El espesor de fleje suele ser de 0,35 mm, aunque para aplicaciones especiales se puede recurrir a flejes de 0,25, 0,40 ó 0,50 mm de espesor.

Al elegir la composición del hilo hay que tener en cuenta el tipo de fundición y los equipos y operaciones de fusión, lo que a su vez depende de las condiciones individuales de cada taller. La resolución de problemas específicos implica adoptar medidas individualizadas, cosa muy difícil cuando se ponen en juego procedimientos convencionales. La tecnología del encapsulado, gracias a su elevada flexibilidad, permite responder a las necesidades metalúrgicas de cada fundidor.

El contenido de magnesio y la temperatura de la fundición en la cuchara tienen un efecto notable sobre el rendimiento de este elemento, junto con el peso tratado y las características dimensionales y forma de la cuchara. El contenido de magnesio, expresado en gramos por metro de tubo, varía en consonancia con el contenido y composición del material de relleno. Ha de tenerse en cuenta que esta riqueza en magnesio influye a su vez en el desarrollo del proceso y en su reactividad.

#### 6.2.14.6. Cálculo de la adición de encapsulado

La adición de magnesio debe ser lo suficientemente grande como para aportar la cantidad necesaria para desulfuración y desoxidación del hierro líquido, compensar lo que se quema y garantizar que después de ello quede el contenido necesario y suficiente de magnesio residual. Para realizar este cálculo hay que conocer previamente algunas magnitudes de proceso como:

- Contenido de azufre del hierro base.
- Conocido final deseado o previsto de magnesio.
- Cantidad de hierro presente en la cuchara de tratamiento.
- Contenido de magnesio en el encapsulado.
- Rendimiento previsto de recuperación del magnesio.

En procesos convencionales de esferoidización la cantidad de magnesio o su aleación se determina haciendo uso de la fórmula clásica de cálculo:

$$Mg_A = \frac{0,76 \times \Delta S + Mg_{RES}}{Mg_{REC}} \times 100$$

En la cual:

- $Mg_A$  Es la adición de magnesio puro, expresada en tanto por ciento.
- $\Delta S$  Es la diferencia entre los contenidos de azufre en el baño, antes y después del tratamiento, expresada en tanto por ciento.
- $Mg_{RES}$  Es el magnesio residual deseado o previsto, expresado en tanto por ciento.
- $Mg_{REC}$  Es el rendimiento o grado de recuperación del magnesio, expresado en tanto por ciento.

Para tratamiento con encapsulado la fórmula queda así:



$$L = \frac{(0,76 \times \Delta S + Mg_{RES}) P_{FUND}}{Mg_{REC} \times Mg_{HILO}}$$

Donde:

L Es la longitud total de hilo necesaria para el tratamiento, expresada en metros.

$P_{FUND}$  Es la cantidad de fundición líquida contenida en la cuchara, expresada en kilogramos.

$Mg_{HILO}$  Es el contenido total de magnesio puro contenido en el hilo o encapsulado, expresado en kilogramos por metro lineal.

El grado de recuperación de magnesio  $Mg_{REC}$  se determina con aproximación haciendo uso de ábacos como el de la Figura 108, si bien debe contrastarse con los análisis obtenidos anteriormente a partir de un número de coladas estadísticamente suficiente. Su valor depende de algunas variables, tales como:

- Contenido inicial de azufre.
- Cantidad de fundición en cuchara.
- Relación altura / diámetro de la cuchara.
- Proceso de adición del nodularizante.
- Contenido en magnesio del nodularizante.
- Magnesio residual previsto o deseado.
- Temperatura de la fundición líquida, teniendo en cuenta el enfriamiento producido en la misma por el tratamiento.

Es necesario pesar la cantidad de caldo contenido en la cuchara de tratamiento, y conocer su contenido de azufre, antes de efectuar la adición de encapsulado, a fin de verificar que la cantidad de hilo sea la adecuada para alcanzar una nodulización correcta. A continuación se presentan dos ejemplos o casos prácticos de cálculo de adición de encapsulado a cucharas de fundición.

Primer ejemplo:

Tratamiento de una fundición elaborada en horno eléctrico de inducción a partir de cargas de calidad, nodulizando sin necesidad de desulfurar. Los datos de partida son los siguientes:

zando sin necesidad de desulfurar. Los datos de partida son los siguientes:

- Peso de fundición en cuchara 2.500 kg
- Temperatura inicial 1500 °C
- Merma prevista de temperatura 25 °C
- Azufre inicial 0,015%
- Azufre final previsto 0,007%
- Magnesio residual previsto 0,030%

Características del hilo:

- Peso total 350 g/m
- Peso de producto 210 g/m

Composición del producto:

- Magnesio 62 g/m
- Silicio 91 g/m
- Tierras raras 3,8 g/m

A partir de estos datos se calcula la adición:

- $\Delta S = 0,015 - 0,007 = 0,008\%$
- Temperatura final =  $1.500 - 25 = 1.475$  °C
- Rendimiento estimado de magnesio para esa temperatura = 40%

$$L = \frac{(0,76 \times 0,008 + 0,030) \times 2.500}{40 \times 0,062} = 36,4 \text{ m}$$

Consumo específico =  $36,4 \times 1.000 / 2.500 = 14,5$  m/t

Segundo ejemplo:

Tratamiento de una fundición elaborada en cubilote, a la que no se ha aplicado ningún tratamiento afinador previo, y con desulfuración y nodulización en una sola etapa. Los datos de partida son los siguientes:

- Peso de fundición en cuchara 1.400 kg
- Temperatura inicial 1480 °C
- Merma prevista de temperatura 30 °C
- Azufre inicial 0,090%
- Azufre final previsto 0,007%

Características del hilo:

- Peso total 350 g/m
- Peso de producto 210 g/m

Composición del producto:

- Magnesio 62 g/m
- Silicio 81 g/m
- Tierras raras 7 g/m

A partir de estos datos se calcula la adición:

- $\Delta S = 0,090 - 0,007 = 0,083\%$
- Temperatura final =  $1.480 - 30 = 1.450$  °C

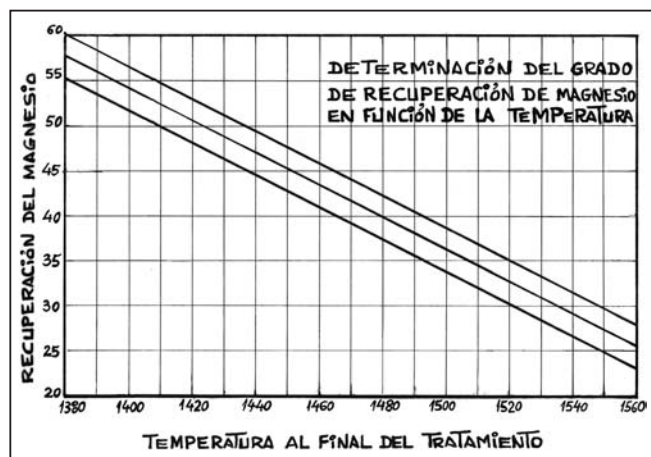


Figura 108.

— Rendimiento estimado de magnesio para esa temperatura = 45%

$$L = \frac{(0,76 \times 0,083 + 0,040) \times 1.400}{45 \times 0,062} = 51,7 \text{ m}$$

Consumo específico =  $51,7 \times 1.000/1.400 = 36,9 \text{ m/t}$

#### 6.2.14.7. Método operativo

Una vez revisada la teoría y cálculos previos a la utilización de los encapsulados de magnesio se finaliza con la revisión de algunos aspectos puramente operativos y prácticos del proceso, como son:

- Desulfuración previa.
- Temperatura de tratamiento.
- Velocidad de inyección.
- Agitación homogeneizadora.
- Desescoriado.

##### 1) Desulfuración previa:

Como el magnesio tiene una gran afinidad para el azufre lo primero que ocurrirá al adicionarlo al hierro es que reaccionará con el azufre de éste para dar sulfuro de magnesio MgS, el cual pasará a la escoria. En consecuencia no es necesario efectuar una desulfuración previa. No obstante, hay que conocer el contenido de azufre del caldo para realizar una dosificación correcta de la adición de magnesio y evitar rechazos. El tratamiento con magnesio asegura el descenso del contenido de azufre hasta valores de un 0,006%. Sólo en el caso de piezas que exijan una limpieza máxima (ausencia total de inclusiones) puede ser necesario realizar una desulfuración y desescoriado previos al tratamiento nodulizador con magnesio. Como ya se revisó en capítulo anterior correspondiente, no se vuelve sobre ello.

##### 2) Temperatura de tratamiento:

Cuando aumenta la temperatura, la presión de vapor del magnesio aumenta de forma exponencial. Por ejemplo, para 1.500 °C esta presión es de 12 bar. Por ello la temperatura a la cual se lleva a cabo la nodulización ha de ser lo más baja posible compatible con la temperatura final de colada requerida. Precisamente, una ventaja importante de la tecnología del encapsulado radica en la baja pérdida de temperatura que provoca, circunstancia que permite realizar el tratamiento a menores temperaturas que con otros procedimientos.

Las temperaturas típicas de tratamiento están en el intervalo 1450 – 1500 °C. No obstante, la experiencia muestra que pueden ser más bajas (1400 °C para fundiciones de tubos centrifugados o de pieza grande) o más alta (1540 °C para pieza pequeña). Como referencia indicativa, en la gráfica de la Figura 108 se mostró la variación

del rendimiento de recuperación del magnesio en función de la temperatura.

##### 3) Velocidad de inyección:

En lo que a velocidad de inyección respecta, la óptima será la que haga llegar el hilo hasta el fondo de la cuchara antes que se produzca su fusión. Una cifra típica de trabajo está entre 20 y 60 metros por minuto, si bien puede llegar a ser de 4 – 200 m/min. La velocidad de alimentación depende de:

- Altura de metal líquido.
- Temperatura de tratamiento.
- Cantidad de magnesio inyectado.
- Tipo de magnesio en el encapsulado.

Es muy importante que la inyección se lleve a cabo siguiendo una línea recta, vertical y centrada en el eje de la cuchara a fin de garantizar un rendimiento elevado y constante de recuperación del magnesio. Para ello hay que verificar que la máquina inyectora y el sistema de guía estén en posición correcta. En la Figura 109 se observa la importancia que tiene para un buen rendimiento del producto tanto la velocidad de inyección como la dirección de penetración del hilo en el baño.

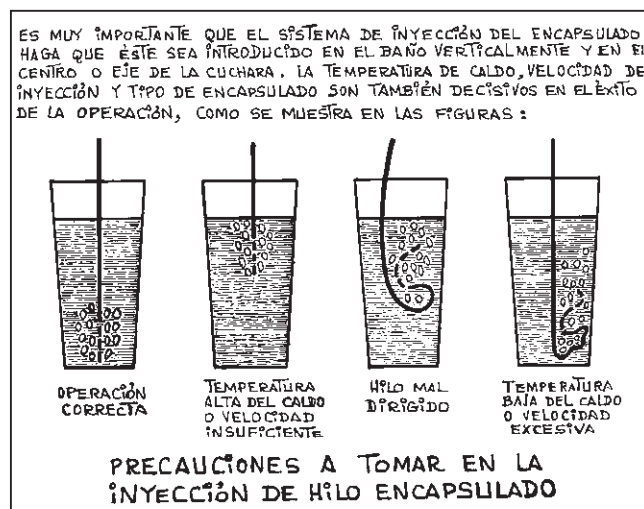


Figura 109.

##### 4) Agitación homogeneizadora:

No es preciso agitación adicional, ya que la llegada de magnesio al fondo de la cuchara y su consiguiente ebullición provocan una agitación controlada suficiente.

##### 5) Desescoriado:

En el caso de hierros base de alto azufre se origina abundante escoria de CaS y MgS, por lo que puede resultar necesario realizar un desescoriado riguroso para mejor limpieza y, por ende, calidad de las piezas obtenidas. Este desescoriado es, por otra parte, muy importante para asegurar una post-inoculación eficiente.

#### 6) Control de proceso y producto:

Si se conecta la estación y su unidad PC con un espectrómetro de emisión para análisis se puede llegar a producción semiautomática de fundiciones nodulares. Se pueden conectar al PC otros periféricos inteligentes como, por ejemplo, báscula electrónica, pirómetros, etc. Esto aporta los valores de los parámetros físicos que coadyuvan al diagnóstico en tiempo real de la calidad metalúrgica. Así, el PC de gestión tiene como tarea básica responder a posibles variaciones de la temperatura y contenido de azufre de la fundición líquida, ordenando modificar la longitud de hilo a añadir. Ningún otro sistema ofrece esta posibilidad.

Utilizando equipos de análisis térmico en solidificación (Leeds & Northrup, Electronite..) es posible también automatizar la preparación del metal determinando rápidamente, y en tiempo real, el grado de nodulización. Esto permite añadir, si es preciso, aleaciones correctoras. Este "retratamiento" no sería posible en otros procesos. El PC mantiene al operador constantemente informado acerca del proceso de elaboración del metal, incluyendo los niveles de magnesio residual. Se puede llevar un informe o registro de la producción diaria, lo que puede ser conveniente, incluso necesario, para certificación u homologación de calidad del metal tratado. Estos datos se sumarían a los restantes que constituyen la "historia clínica" de la pieza o lote de piezas.

#### 6.2.14.7. Ventajas obtenidas con el encapsulado

La utilización del hilo encapsulado ha aportado mejoras sustanciales en el trabajo de los talleres que fabrican piezas de fundición nodular. Estas ventajas pueden expresarse fácilmente en términos de ahorro de costos de fabricación y se materializan en tres campos, como son los operativos, cualitativos y medioambientales. A continuación se revisan algunas de ellas:

##### Ventajas operativas:

- No hay que preparar y pesar con antelación bolsas de nodulizante y cubriente para todas y cada una de las cucharas que se han de tratar; tampoco se precisa la envuelta protectora que suele ser necesaria en los procesos de inmersión.
- Rapidez de respuesta frente a variaciones del hierro base, lo que redundará en mayor flexibilidad en el trabajo.
- El equipo de tratamiento, si está bien instalado y organizado, puede ser manejado por una sola persona, que puede ser el mismo conductor de la carretilla transportadora u operario del puente grúa o transportador.
- La automatización e informatización del proceso hace que pueda ser llevado a cabo por personal poco cualificado.

- Se produce una cantidad pequeña de escoria en la operación, con lo que no se deterioran las cucharas y no se necesita reparar diariamente, a diferencia de otros sistemas, los fondos de cuchara y pozos de nodulizante.
- En el caso de fundiciones procedentes de cubilote puede obviarse el tratamiento previo desulfurador.
- Menor pérdida de temperatura, con ahorro energético y menor desgaste de refractarios.
- Puede aplicarse la informática y automática a todo el ciclo de operaciones.
- Es un proceso abierto e independiente, lo que le hace fácilmente integrable en talleres automatizados de moldeo, especialmente en máquinas automáticas de colada.

##### Mejoras en calidad:

- El proceso permite una adición exacta de nodulizante, con mejor control de rendimiento y, en consecuencia, del magnesio residual
- No se incorpora silicio, y se puede aumentar el contenido de retornos en la carga fría del horno, equilibrándose así la generación y el consumo de los mismos.
- Se adiciona menor cantidad de aleación nodulizante con la consiguiente obtención de hierro más limpio de inclusiones, ayudada también por el efecto de purga producido.
- Se tienen en el mercado composiciones de hilo específicas y adaptadas a la medida de los hierros base elaborados en cada momento en la planta de fundición.
- El control del magnesio garantiza constancia y fiabilidad de calidad, tanto desde el punto de vista estructural (características mecánicas) como de sensibilidad a problemas de contracción.
- El control por ordenador se adapta perfectamente al mantenimiento de control escrito y gráfico de todas y cada una de las piezas fabricadas, lo que sirve como control de salida y, a la vez, para llevar una "historia clínica" de los productos.

##### Ventajas medioambientales:

- Hay un control total de los humos y vapores captados en la estación de tratamiento.
- El sistema de captación de humos es fácil de instalar y de bajo costo.
- En talleres que disponen de sistemas integrados de depuración de humos es fácil conectar la absorción de humos de la estación de tratamiento al equipo depurador central.

(Continuará)

## PRÁCTICA DE FUNDICIÓN: FABRICACIÓN DE FUNDICIÓN NODULAR (Parte 12)

*José Luis Enríquez  
Enrique Tremps*

### 6.2.14.8. Fundiciones favorecidas con esta tecnología

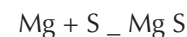
- Fundiciones que pueden tener problemas derivados del procesamiento de escoria de carburo generada en una desulfuración convencional.
- Fundiciones de cualquier tamaño que tienen problemas medioambientales por humos.
- Instalaciones en las que se producen fundiciones grises y nodulares a partir del mismo hierro base. También cuando se trabaja con fundiciones elaboradas en cubilote a las que se puede desulfurar y nodulizar en la misma operación.
- Cuando se fabrican piezas bajas en silicio que imposibilitan reciclar sus propios residuos.
- Plantas en las que se producen fundiciones nodulares tratando en el mismo turno cucharas con distintas cantidades de caldo.
- Cuando se producen fundiciones de grafito compacto que obligan a mantener control estricto de la adición de magnesio.
- Talleres en los que se desea implantar un tratamiento esferoidizante con magnesio totalmente automatizado y con adiciones controladas y precisas. Aún más si se desea que todas las variables operativas queden reflejadas en un parte o documento diario.
- Finalmente, este procedimiento se hace casi imprescindible en empresas de fundición que desean cumplir las normas ISO de calidad o medioambientales.

### 6.3. MANTENIMIENTO DE LA FUNDICIÓN NODULIZADA

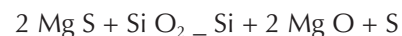
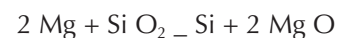
#### 6.3.1. Desaparición de la nodulización

Una fundición puede haber sido correctamente tratada y

tener un grafito perfectamente esferoidal. Sin embargo, al cabo de un tiempo relativamente corto, los nódulos de grafito se han transformado en láminas; es el fenómeno de desvanecimiento (“decay”) de la acción nodulizadora, sobre el cual hay diferentes teorías y explicaciones. Una causa clara podría ser la desaparición del magnesio por combinación con oxígeno o azufre:



Dado que la afinidad por el oxígeno es mayor que por el azufre, la reacción predominante será la primera, favoreciéndose la formación del óxido en lugar del sulfuro. Si la fuente de oxígeno no es el aire sino un óxido (sílice, por ejemplo), las reacciones ahora serían:



Hay factores que influyen en la velocidad de desvanecimiento. Por ejemplo, cuanto mayor es el contenido inicial de magnesio o la temperatura de la fundición, más rápido será el desvanecimiento. Por otra parte, la retirada rápida de la escoria contribuye a frenar ese efecto desfavorable. Finalmente, el desvanecimiento de la acción nodulizadora se da con más rapidez frente a un revestimiento ácido (sílice) que otro básico (magnesia o dolomía). Pero además se produce un desvanecimiento adicional que se manifiesta en el menor número de nódulos por mm<sup>2</sup> y por la pérdida de esferoidización del grafito, que no puede explicarse simplemente por altos contenidos de azufre o por un contenido inadecuado de magnesio.



### 6.3.2. Ensayos realizados

A pesar del tiempo transcurrido desde el descubrimiento de la fundición con grafito esferoidal, su fabricación sigue siendo un proceso discontinuo. No se han descubierto métodos continuos fiables y el nodular sigue siendo un material susceptible al desvanecimiento. A partir de la década de los setenta se hicieron grandes esfuerzos de investigación y desarrollo para mantener la fundición nodulizada durante períodos prolongados de tiempo.

Es indudable que para mantener un metal líquido nodulizado durante largos períodos de tiempo es preciso almacenar dicho metal en un recipiente que lo mantenga al abrigo de cualquier posible oxidación del magnesio, en reposo y a temperatura constante. Esta premisa puede cumplirse si se trabaja con un horno de inducción de canal provisto de un sistema de introducción de gas inerte, nitrógeno o argón (proceso Spal), que evite cualquier contacto de la superficie del baño con el oxígeno ambiental. El horno, además de ser estanco, habrá de estar revestido con refractario básico (magnesita o dolomía).

John Deere, en su factoría de East Moline (Illinois) conseguía mantener el metal nodulizado durante 10 horas. En la fundición Volvo de Arvika (Suecia) eran 8 horas. Five Star Industries Dewey (Oklahoma), en horno de canal vertical de 5 toneladas, mantenía 2 a 4 horas con unas pérdidas de magnesio de sólo 0,003% cada hora, para alimentar a una línea automática de moldeo. La American Cast Iron Pipe Company, de Birmingham (Alabama) empleó un horno de canal vertical de 30 toneladas con protección de gas natural. En España, y a finales de esa misma década, la fundición cooperativa Ederlan, de Escoriaza (Guipúzcoa) investigó un proceso basado en fusión en horno de crisol y mantenimiento en horno de canal.

### 6.3.3. Proceso industrial

Mantener la fundición líquida nodulizada ofrece varias ventajas, siempre y cuando se minimice la degradación metalúrgica. Por ejemplo, se reduce el número de tratamientos, proporcionando, por tanto, un tipo semicontinuo de trabajo más flexible y barato; alcanzar buen control del contenido de magnesio mediante dilución con fundición no tratada; y, finalmente, flotación de la escoria y consiguiente disminución de los defectos provocados por ésta. Todo ello implica recibir y mantener la fundición líquida base tratada con magnesio en un horno hermético de inducción de canal. La entrada de caldo estará dispuesta de forma que se evite la entrada de aire a la cámara de mantenimiento del horno, haciéndose la colada por un sis-

tema sifónico. La parte de la cámara de mantenimiento que no está ocupada por el caldo se llena de argón con una pequeña presión positiva en su interior.

Es mejor emplear argón porque se ha visto que el nitrógeno tiende a formar nitruro de magnesio  $Mg_3N_2$  y el grafito esferoidal se desvanece en un tiempo relativamente corto. Con cubrimiento de argón la fundición aguantaría 6 a 10 horas a casi 1.300 °C sin que se produzca desvanecimiento. Y es que, por otra parte, el vapor de magnesio es forzado a introducirse en el baño gracias a la acción combinada de la mayor presión de gas argón y el efecto de circulación del caldo en el canal del inductor.

El método normal es llenar el horno con una fundición nodulizada pero no inoculada, la cual se va extrayendo para colar moldes a la vez que recibe la inoculación con ferrosilicio del 75% o cualquiera de sus variantes.

### 6.3.4. Sistema Presspour

La experiencia adquirida ha sido aprovechada para la fabricación de fundiciones nodulares desde 1972 en la firma A.B. Jarnforsdning, de Halleforsnas, Suecia. Se emplearon hornos de inducción de canal, de 3, 10, y 20 toneladas para mantenimiento de caldo nodulizado. Los hornos, de construcción hermética, fueron diseñados y contruidos por el Departamento de Hornos de la firma sueca ASEA, y han devenido en lo que en la actualidad está ampliamente difundido con la denominación de equipo Presspour. El horno lleva un sistema de cierre y sellado, así como una dosificación para el gas. Además, el sistema automático de colada presurizada produce menos defectos por impurezas, con la consiguiente mejora en las características mecánicas de las piezas obtenidas (Figura 110).

En un horno de este tipo, diseño "teapot", para rellenar y colar, el magnesio del caldo está en equilibrio con la at-

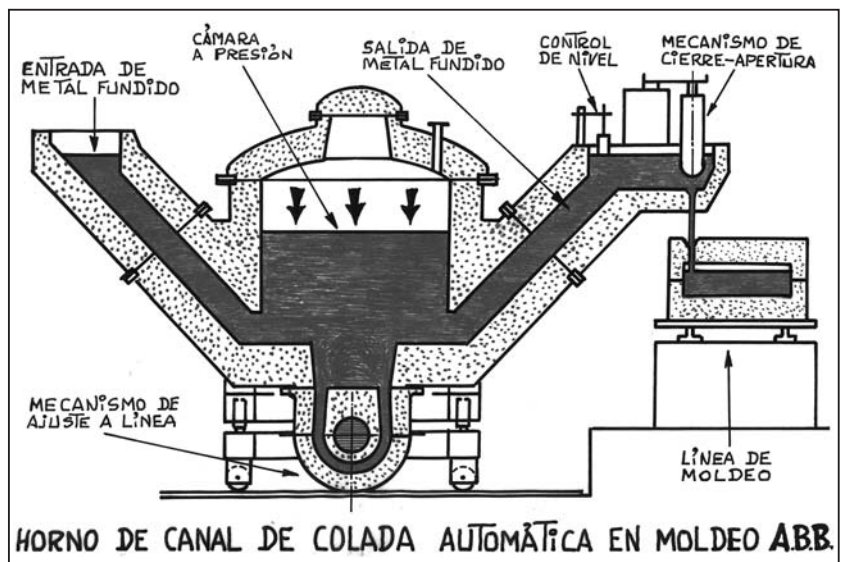


Figura 110.

mósfera del horno. Al no haber oxígeno en ella, no habrá consumo de magnesio y, en consecuencia, el tiempo de mantenimiento podría llegar a ser teóricamente infinito. Sin embargo, en la práctica, una cierta merma de magnesio es inevitable, debido principalmente a fugas en el cierre de la cuba del horno, combinación con el refractario, reacción con óxidos, etc. Pruebas realizadas en un horno de 14 toneladas han demostrado la posibilidad de 7 u 8 horas de mantenimiento, cuando en condiciones convencionales atmosféricas serían sólo 15 minutos. El contenido en magnesio para un 80% de nodulización sería de 0,011%, mientras que en condiciones convencionales sería de 0,035%. El porcentaje de disminución de magnesio en Press-Pour es unas treinta veces menor. Durante el servicio se puede emplear nitrógeno como gas protector, usándose el argón en los períodos de mantenimiento.

Aparte de las ventajas mencionadas, aparecen otras de tipo operativo y de calidad. La fundición nodular de buena calidad puede colarse varias horas después del tratamiento nodulizante. El almacenamiento de la fundición nodular resulta en la separación de los productos de reacción de la fundición, eliminando porosidades y problemas de espumas y reduciendo la incidencia de los carburos. Finalmente, se mejora la fluidez de la fundición depurada por almacenaje, mejorándose también las características de alimentación.

## 6.4. INOCULACIÓN DE LA FUNDICIÓN NODULIZADA

### 6.4.1. Fundamento metalúrgico

La inoculación es un paso necesario en la producción de fundición nodular. Las fundiciones nodulizadas pero no inoculadas tienen matrices casi exclusivamente carbúricas. Por otra parte, el grafito formado en la nucleación residual puede quedar en forma de compactado en lugar de esferoidal. El tratamiento inoculador es, por ello, muy importante, y debe llevarse a cabo con el mismo cuidado y precisión que el de la nodulización. En el caso de la fundición nodular, la inoculación es la forma de inducir la formación de esferoides de grafito (suprimiendo a la vez la generación de carburos) y aumentar el número de células eutécticas. Hay varias teorías que intentan explicar el fenómeno. Una apunta que las partículas de un inoculante fuerte, como el ferrosilicio, al disolverse aumentan momentáneamente el contenido de silicio en la porción de metal que les rodea, sobresaturándose respecto al carbono y precipitando partículas nucleantes de grafito. También hay que tener un tamaño de partícula de FeSi superior al crítico, ya que las muy pequeñas no aportarían suficiente concentración local de silicio antes de disiparse. La temperatura también influye, de manera que para tener rendimiento inoculador ha de ser superior a unos 1.480 °C.

Además del FeSi hay otros elementos o combinaciones que actúan como inoculantes y promueven la formación

de grafito esferoidal como, por ejemplo, calcio, aluminio, bario, estroncio y nitruros de boro. Los carburos de estos elementos tienen estructuras cristalinas similares a la del grafito, con lo que pueden actuar como semillas o centros de esferoidización.

### 6.4.2. Factores que influyen

La cantidad de carburos que se forman en piezas de pequeño espesor coladas con fundición nodular puede reducirse mediante:

- Temperaturas elevadas de colada, comprendidas entre 1.320 y 1.480 °C.
- Un azufre en el hierro base superior al 0,020%.
- Trabajar con un hierro base de elevado carbono equivalente, en el orden de 4,5 a 4,8%.
- Presencia de una pequeña cantidad (0,002 a 0,010%) de cerio.
- Efectuar un tratamiento nodulizador que lleve el contenido de magnesio a un intervalo de 0.030 a 0,045%, según azufre inicial.
- Realizar una inoculación relativamente fuerte, con aumento de 0,70 a 1,00% en el contenido de silicio.

En general, puede decirse que en piezas delgadas, de espesores menores de unos 5 mm, niveles bajos de contenido de carburos van acompañados de elevadas cuentas de nódulos y de células eutécticas. Puede decirse que una inoculación de 10 kg / t de ferrosilicio del 75% y conteniendo calcio tiene un buen efecto reductor de carburos. Por otro lado, la inoculación en el molde con FeSi 75% es una forma muy efectiva de minimizar la aparición de carburos masivos en piezas de nodular. Otro aspecto importante es el momento en que se efectúa la inoculación, ya que si se hace inmediatamente después de nodulizar, el efecto tiende a desvanecerse si el metal está en espera durante período largo de tiempo antes de colar.

### 6.4.3. Inoculantes empleados

El ferrosilicio de 75% es el inoculante más empleado. Se prefiere el que contiene algo de calcio, ya que posee mayor poder eliminador de temple. Un contenido mayor de silicio no redundaría necesariamente en mayor poder inoculante. Por ejemplo, una adición de silicio puro a fundición destinada a piezas delgadas no logra anular totalmente el efecto carburizante del magnesio. En cuanto a tamaño, el más aceptado es de unos 10 mm, aunque también se trabaja con granos menores.

Los inoculantes que contienen aluminio y calcio son más eficientes que los que sólo tienen uno o ninguno de estos elementos. Ha de tenerse presente que el aluminio aumenta la tendencia a captar hidrógeno y, en consecuencia, originar el defecto de "pinhole", por lo que su contenido ha de mantenerse bajo. El ferrosilicio más difundido es el

que tiene menos de 1,50% de calcio y de 1,50% de aluminio. Los contenidos medios, tanto de calcio como de aluminio, son de un 1,00%.

Hay variantes del ferrosilicio como el Inoculoy inicialmente fabricado por la Foote Mineral Company. Su composición es: 60 - 65% Si, 1,50 - 3,00% Ca, 1,00 - 1,50% Al, 4 - 6% Ba, 9 - 12% Mn y resto Fe.

Muchos fabricantes de piezas en nodular tienen dificultad para mantener el contenido de silicio por debajo de un límite máximo cuando reciclan todos sus retornos. Esta circunstancia obliga a reducir la magnitud de la inoculación lo que a su vez redundará en la obtención de una fundición de peor calidad que, en piezas delgadas y en bruto de colada, presenta cantidades fuertes de carburos y obliga a realizar un tratamiento térmico largo y costoso.

Este problema, que no suele presentarse en los procesos que nodulizan con magnesio puro, puede solventarse con el Inoculoy o derivados. Se obtiene una inoculación efectiva para piezas de 10 mm de espesor con 4,60 de carbono equivalente mediante la adición de 0,13 a 0,20%. Para obtener los mismos resultados con ferrosilicio se precisa una adición de 5 a 7 kg por tonelada, lo que equivale a un 0,40 a 0,56% de silicio puro. El empleo de grandes cantidades de ferrosilicio puede aumentar los contenidos de aluminio en el hierro nodular, lo que lleva a mayor probabilidad de pinholes en las piezas.

#### 6.4.4. Método de inoculación

El mejor sistema de inoculación del nodular consiste en añadir el ferrosilicio pausadamente al chorro de fundición en el momento del recuchareo (trasvase) de manera, que siempre que sea posible, cada partícula de silicio se encuentra con una porción "fresca" de caldo. Menos favorable es colocar la ferroaleación en el fondo de la cuchara sobre la que se va a verter la fundición líquida, de manera que la temperatura del ferrosilicio aumente hasta el punto que pierda una parte considerable de su capacidad inoculadora.

Esto ha quedado fehacientemente demostrado por el hecho de que el FeSi fundido no tiene ningún efecto inoculador. Hay otros métodos igualmente desfavorables como añadir el inoculante con la aleación nodulizante o verter el inoculante sobre la superficie de la cuchara e intentar introducirlo en el metal por agitación; en este último caso solamente queda inoculada la parte superior del caldo contenido en la cuchara.

La cantidad requerida de inoculante depende de la composición del hierro líquido, espesor y velocidad de solidificación de la pieza, tipo de horno de fusión y composición del inoculante empleado. Para minimizar la formación de carburos en piezas de espesor pequeño se efectúan adiciones más fuertes de ferrosilicio, de hasta 1,00%. En el caso de piezas gruesas, con más de 50 mm

de espesor, hay riesgo de flotación de carbono grafitico, por lo que el carbono equivalente debe ser menor que 4,3, las adiciones de silicio en forma de FeSi pueden mantenerse entre 0,25 y 0,30; en este caso resulta ventajoso el empleo de Inoculoy,

#### 6.4.5. Métodos especiales de inoculación

##### 1) Proceso con una sola cuchara:

Cuando las circunstancias no dejan trabajar a doble cuchara ambas operaciones (nodulización y post-inoculación) pueden llevarse a cabo en una sola cuchara. En ese caso, el procedimiento normal es depositar la mitad del inoculante, junto con todo el nodulizante, en el fondo de la cuchara. Cuando la cuchara de tratamiento ya ha recibido dos tercios del total de líquido se echa el resto del inoculante de forma que éste se mezcle eficientemente con el líquido. Debe ponerse el máximo empeño en conseguir tanta agitación como sea posible en el momento de hacer la adición final de inoculante.

Otra posibilidad es mezclar carburo de silicio de alta pureza con el nodulizante. Así se siembra el líquido tratado con núcleos de gran duración que mantienen inoculado el hierro durante largo período de tiempo. Son válidas adiciones de un 0,50% de silicio en forma de carburo de silicio tipo abrasivo de alta pureza.

Este mismo procedimiento puede llevarse a cabo durante la basculación de un horno eléctrico, con lo que se elabora hierro nodular sin necesidad de recuchareo. Por supuesto que la calidad de la fundición obtenida no llega a la que se fabrica por recuchareo o por tratamiento en dos etapas. Entre otras cosas, pueden aparecer nódulos mal formados o grafito vermicular, sobre todo en piezas gruesas de enfriamiento consiguientemente lento, mientras que en piezas finas pueden formarse carburos. Estos problemas pueden solventarse mediante inoculación en el molde introduciendo 0,05 a 0,10% de finos de FeSi en el sistema de colada. Esta práctica se ha mostrado efectiva incluso en piezas grandes de hasta 20.000 kg de peso.

##### 2) Reinoculación:

El efecto inoculante desvanecido puede restaurarse mediante la adición de una pequeña cantidad de ferrosilicio. Por ejemplo, si una cuchara inoculada con un 0,75% de silicio ha tenido que estar en espera debido a una avería en el puente grúa puede restituirse su estado plenamente inoculado añadiéndole una pequeña cantidad de silicio (0,15% de Si, aproximadamente). Cuando se cuelan piezas delgadas que precisan controlar perfectamente las estructuras en bruto de colada, puede ser útil reinocular la cuchara con adiciones pequeñas de silicio efectuadas a intervalos periódicos.

(Continuará)

# F

## PRÁCTICA DE FUNDICIÓN: FABRICACIÓN DE FUNDICIÓN NODULAR (y Parte 13)

*José Luis Enríquez  
Enrique Tremps*

Las consideraciones planteadas en párrafos anteriores pueden llevar a dudar de la factibilidad de obtener piezas de grandes espesores cuya solidificación exige varias horas. En contra de lo que se podría pensar, no existe problema, ya que solidifica la piel inmediatamente, impidiendo la pérdida de magnesio por oxidación, y esos espesores tan grandes hacen innecesaria la inoculación grafitizante. De hecho, se han fabricado yunques y rodillos de grandes espesores sin que fuera necesario post-inocular para obtener estructuras satisfactorias de grafito esferoidal.

### 3) Doble inoculación:

Se ha visto que una pequeña adición de ferrosilicio (0,20% - 0,30% ) durante la transferencia del hierro a la cuchara de colada contribuye a eliminar carburos en piezas delgadas y temple inverso en secciones medias. Así, en lugar de añadir todo el inoculante de una vez, se recomienda dividir la inoculación en dos porciones, la menor de las cuales se añade justo en el momento de colar. Este tipo de tratamiento es especialmente ventajoso cuando hay un lapso de tiempo largo entre inoculación y colada.

### 4) Inoculación en el molde:

Se desarrolló originalmente como medio de eliminar los carburos de línea central ("centerline") y la formación de carburos en espesores menores de 5 mm. Es una forma secundaria de inoculación que supera el desvanecimiento o el fracaso de otras prácticas de inoculación. Es un procedimiento relativamente sencillo:

Se coloca un gramo de ferrosilicio ( 75% Si – 1,00% Al – 1,00% Ca ) en la cubeta de colada o en el pocillo ("choke") situado en la parte baja de la caña del bebedero. El tamaño de grano es el que pasaría por un tamiz de unos 5 mm de luz. Granos muy gruesos no se disolverían totalmente y los más finos se oxidarían en contacto con el hierro, dando lugar a grafitización mediocre. El

moldeador posiciona el FeSi en cada molde antes de cerrarlo, utilizando para mejor control, una cucharilla aforada que contenga un gramo de aleación. Para una pieza de unos 70 kg de peso puede ser suficiente con 2 g de aleación. Estas adiciones granuladas pueden hacerse también como tabletas de 1, 2, ó 3 g de ferrosilicio (u otro inoculante) aglomerado con parafina o silicato sódico.

Algunos productores de piezas de fundición nodular al níquel hacen la inoculación en molde con grafito en polvo en lugar de ferrosilicio, en un intento de minimizar el aumento del contenido de silicio. Aunque es ventajoso efectuar fuertes adiciones de inoculante, es deseable que el contenido final de Si en el hierro no supere el 2,5%, ya que contenidos mayores tienen un efecto fragilizante debido al aumento de la temperatura de transición de impacto.

Aparte de compensar la tendencia al desvanecimiento, adiciones muy pequeñas en el molde parece que tienden a nuclear el grafito, generando más nódulos y de menor tamaño. Esta inoculación evita tener que efectuar costosos tratamientos realizados para grafitizar los perjudiciales carburos.

### 5) Inoculación continua:

Se hace en el último momento, de forma automática y con el inoculante siendo introducido con el caldo en el bebedero durante la colada de cada molde. Pueden ser finos de inoculante entubados en chapa de acero dulce (como el nodulizante encapsulado), en un sistema parecido a la soldadura automática con electrodo hueco y fundente en su interior. Una alternativa consiste en introducir con el mismo sistema varillas del inoculante en el chorro de colada.

Estos sistemas de inoculación instantánea en el molde plantean problemas de limitación del porcentaje de inoculante. Por ello, la práctica más adecuada es inocular la cuchara por métodos convencionales, dejando el último 0,1 a 0,2% para la inoculación discontinua en el molde



o continua en el chorro de colada. Esto es particularmente efectivo cuando el caldo tratado y parcialmente inoculado ha de transportarse una larga distancia antes de colar y el metal ha de transferirse desde la cuchara de transporte a las de colada.

#### 4.4.6. Desvanecimiento de la inoculación

En la fundición nodular el efecto de desvanecimiento del efecto inoculantes se da de la misma forma que en la fundición gris. El período efectivo de tiempo suele ser de 10 a 15 minutos en el caso de una inoculación con ferrosilicio a secas. Si se usa Inoculoy, la duración es mayor.

Si las piezas son ligeras (menos de 10 mm de espesor) el desvanecimiento se dará a mayor velocidad. También influye el carbono equivalente: Una fundición de 3,4% de carbono y 1,8% de silicio, que presenta consiguientemente bajo poder grafitizante, será más sensible al tiempo de mantenimiento que otra de 3,8% de carbono y 2,5% de silicio con mayor poder grafitizante. Otro factor a considerar es la temperatura, de manera que el efecto inoculador se desvanece tanto más rápido, cuanto mayor es la temperatura de la fundición líquida.

Por otra parte, si en moldes de arena en verde se cueban piezas que requieren un estrecho control estructural en bruto de colada, deben colarse cuñas de temple a intervalos regulares para asegurarse que la fundición nodular permanece eficientemente inoculada, desde el primer molde colado hasta el último.

## 5. CALIDAD DE LA FUNDICIÓN NODULAR

Como en todos los procesos de fabricación, la obtención de piezas correctas tiene dos aspectos en orden cronológico. El primero es las normas a cumplir y precauciones a seguir para que las piezas fabricadas estén libres de defectos y de acuerdo con las especificaciones del cliente. El segundo es la verificación a posteriori de que esas piezas han salido de taller con la calidad y características prescritas. Dicho en otros términos, habrá un control de calidad preventivo y otro de salida. En la figura 111 se presenta el conjunto de operaciones de control de las piezas de nodular.

Los programas de control de calidad en las fundiciones que fabrican nodular deben estar cuidadosamente planificados, documentados y seguidos si se pretende garantizar una calidad constante en las piezas. La fabricación de este material no es un proceso autocontrolado en el que los sistemas de control tengan un simple valor marginal. Entre otros, aparecen como más importantes los siguientes:

- Inspección de materias primas empleadas en el proceso.
- Control de carga del horno.
- Composición del hierro base.
- Mantenimiento de temperatura constante del hierro base.

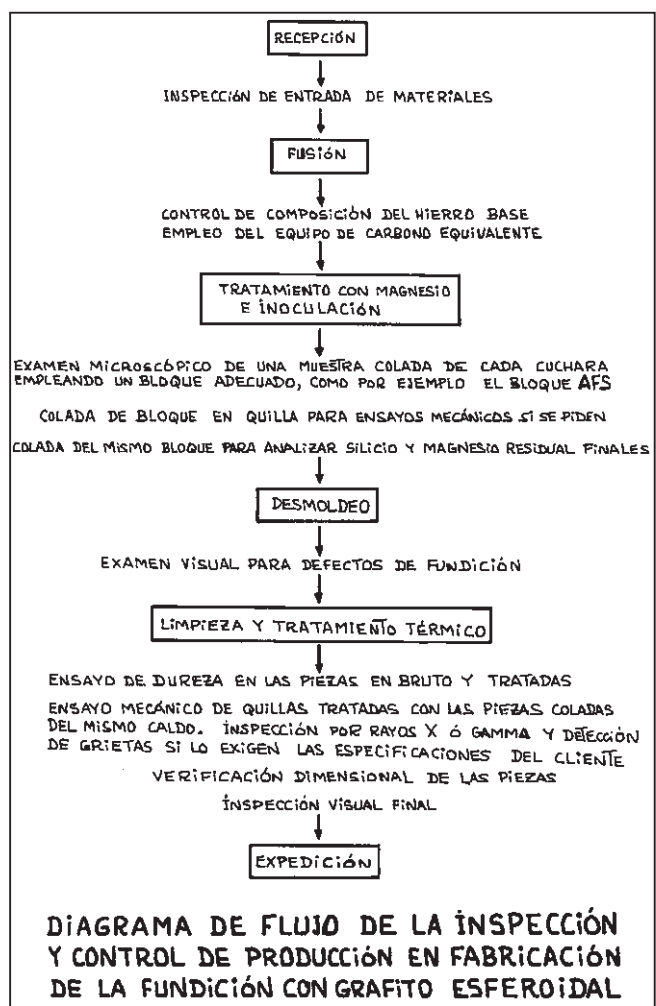


Figura 111.

- Pesada del metal antes del tratamiento.
- Pesada de nodulizantes e inoculantes.
- Microexamen de muestras después de cada tratamiento.
- Análisis químico de la fundición nodular.
- Prescripciones de resistencia a la tracción.
- Ensayos de dureza de las piezas.
- Inspección visual de las piezas coladas.
- Ensayos especiales de control.
- Determinación eutectométrica de nodularidad.

A continuación se revisan algunos de estos controles:

Inspección de materias primas:

Deben establecerse normas o especificaciones bien definidas para todos los materiales empleados en la fabricación del nodular. Intentar obtener una chatarra de acero de la composición más constante posible. En caso de fabricación de gris y nodular en la misma fundición, los retornos de los respectivos materiales deben clasificarse cuidadosamente. Finalmente, hay que exigir a los proveedores de aleaciones de tratamiento, información exacta sobre composición y granulometría de ellas.

Carga fría de los hornos:

Deben pesarse todas las cargas del horno previstas para la obtención de una composición determinada del hierro base, a tratar en función, a su vez, de la calidad nodular a obtener.

Composición del hierro base:

La composición de la fundición líquida que recibirá el tratamiento de nodulización requiere un control muy cuidadoso y rápido de los contenidos de carbono, silicio y azufre, a fin de predeterminedar las adiciones de nodulizantes e inoculantes. Por ejemplo, el contenido de azufre es de importancia primordial para prever la cantidad de magnesio necesaria para el tratamiento nodulizador. Junto con el carbono puede analizarse con bastante velocidad mediante métodos de combustión (Ströhlein, Leco...). A su vez, la introducción del carbono en los valores de temperaturas críticas mostradas por ensayos de curvas de enfriamiento permiten conocer el silicio. Aparte de estos ensayos, la gran mayoría de las empresas que fabrican fundición nodular, cuentan con espectrómetros de emisión que hacen posible la determinación rápida de una larga lista de elementos.

Si los resultados del análisis químico se emplean como base de cálculo para la composición de la carga fría del horno, hay que apoyarse en tendencias y no en valores instantáneos. Si se aprecia un cambio en la tendencia o en varios resultados analíticos es llegado el momento de efectuar correcciones en la composición de la carga del horno.

Mantenimiento de temperatura constante del hierro base:

Hay que asegurar constancia de temperaturas de tratamiento nodulizador de las fundiciones líquidas si se desea, por ejemplo, mantener constantes las recuperaciones de magnesio y las prescripciones de aleaciones de tratamiento. Una de las causas principales de bajas recuperaciones de magnesio es la temperatura de tratamiento elevada. Sin embargo, bajas temperaturas de tratamiento originarán recuperaciones excesivas de magnesio que, a su vez, redundarán en la formación de carburos, "pinholes", "dross" y piezas defectuosas por falta de llenado.

Por estas razones, es absolutamente preciso mantener las temperaturas del líquido base dentro del intervalo de valores especificado. En el caso de fusión eléctrica el control de temperatura puede hacerse por pirometría de inmersión en cada colada. Cuando se funde en cubilotes pueden pirometrarse ópticamente todas y cada una de las cucharas, haciendo un control periódico aleatorio por inmersión.

Pesada de la fundición líquida base:

Muchos rechazos en piezas de nodular se producen por tener cantidades inadecuadas de hierro base antes del tratamiento. Por ello es imprescindible pesar el caldo de la

cuchara si se quieren evitar sorpresas costosas y, a veces, desastrosas.

Pesada de todas las aleaciones e inoculantes:

Todos los productos de adición empleados en la fabricación de nodular han de pesarse previamente. La sustitución del control de pesada por la dosificación volumétrica dará lugar invariablemente a pérdida de control de proceso y, por consiguiente, a mayores porcentajes de rechazos.

Microexamen de muestras después de cada tratamiento:

La fractura de una probeta de temple enfriada en agua da idea, para una persona experimentada, del grado de nodularidad obtenido. Antes de colar la fundición nodulizada debe hacerse un microexamen rápido, en sitio cercano a la zona de tratamiento, para determinar la forma del grafito. Adicionalmente, del último metal colado debe tomarse una muestra normalizada para verificar que el grafito aún mantiene su forma esferoidal. Esta muestra se cuela en el molde A.F.S., elaborado en arena aglomerada con resina (arena de machos) visto en la figura 112. Conviene hacer algunas sugerencias y puntualizaciones:

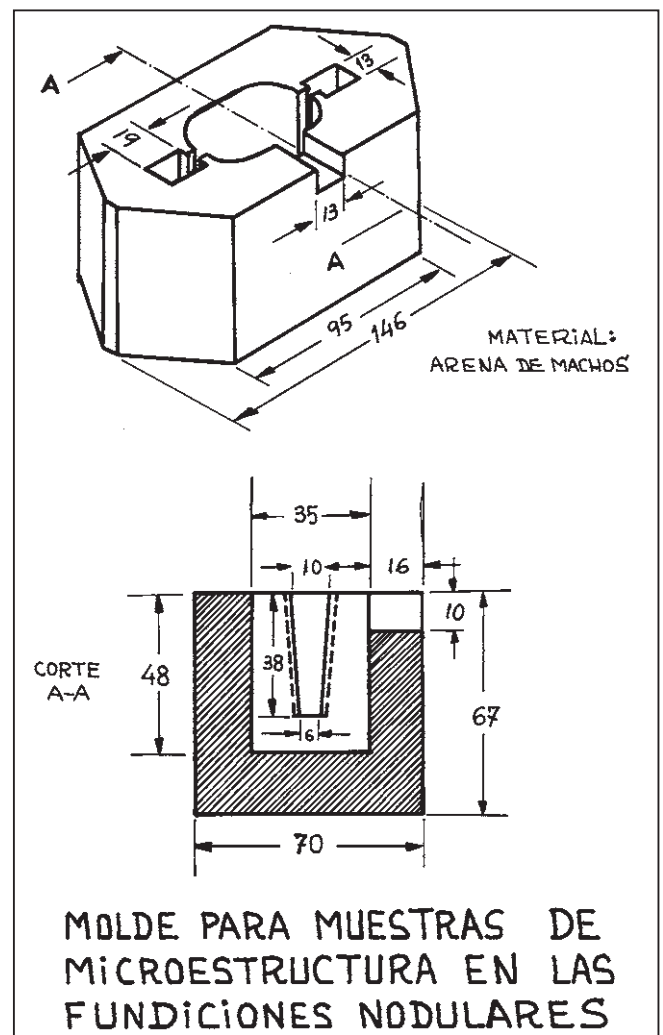


Figura 112.

Para efectos de control de calidad "on line" las probetas no necesitan ser pulidas hasta el acabado que se precisa en la obtención de microfotografías. Así, el equipo para pulido consiste simplemente en una esmeriladora pequeña de banco con una rueda basta y otra fina, o una pulidora de banda y un pulidor de disco con dos cabezas pulidoras y control de velocidad. Cada cabeza o plato debe estar equipado con dos papeles de pulido, que normalmente son de los números 0, 00, 000 y 600. El pulido comienza con esmerilado y papel del 0 y continúa hasta llegar al 600.

No se precisa llegar a mayor grado de pulido porque normalmente la muestra se visiona con pocos aumentos. Cuando las micro-muestras no se separan con una rueda de corte refrigerada por agua la superficie basta debe amolarse, hasta quedar plana y lisa, con una esmeriladora o una lijadora de banda. Se recomienda esta práctica para disminuir el tiempo de pulido y alargar la duración de los papeles de lija.

En cuanto a microscopía, para control rápido de proceso puede bastar con un microscopio metalográfico barato. Éste puede estar equipado con una lente que tenga buena resolución entre 50 y 100 diámetros, aumento más que suficiente para ver si los nódulos de grafito tienen forma correcta y no aparece grafito laminar.

Para este examen rápido se emplea la muestra colada en el molde A.F.S. visto en la figura 112 citada anteriormente. La operación dura dos o tres minutos y debe hacerse, siempre que sea posible, antes de colar las piezas. El método a seguir es el siguiente:

- Colar la muestra a partir de caldo nodulizado e inoculado.
- Una vez solidificada la muestra enfriarla suavemente en agua.
- Separar la muestra por fractura o corte.
- Esmerilar hasta superficie plana.
- Pulir progresivamente la muestra en el orden previsto.
- Examinar al microscopio para controlar el grafito.

#### Análisis químico de la fundición nodular:

Debe realizarse un análisis químico completo de muestras seleccionadas de la producción de cada día, así como de lotes cuyo tratamiento no haya sido totalmente satisfactorio. Puede ser útil un control continuo del magnesio en combinación con el examen microscópico de la forma del grafito. Los elementos más importantes (en lo que tiene que ver con su influencia sobre las propiedades del nodular) son carbono, silicio, manganeso, azufre, fósforo, níquel, cobre, cromo y molibdeno.

Si el análisis se realiza, como es normal, por espectrometría de emisión, la muestra debe estar templada. Para ello hay que colar una probeta de espesor delgado en un molde metálico que promueva gran velocidad de enfriamiento. Suele ser una probeta en forma de disco de unos

40 mm de diámetro por 10 mm de espesor, colada en un molde, con separación plana, elaborado en cobre con un 5% de cromo. Esta aleación presenta buena conductividad térmica (y consiguiente efecto templante) manteniendo resistencia mecánica suficiente.

#### Resistencia a la tracción:

Las muestras de ensayo se mecanizan a partir de bloques en "Y" o quilla, colados en arena aglomerada (arena de machos), según los diseños presentados en la figura 113. En la etapa inicial de implantación en taller de la fabricación del nodular es conveniente realizar ensayos de tracción con mucha frecuencia a fin de establecer prácticas de rutina y relacionar las propiedades mecánicas con la microestructura. Deben colarse muestras de todas y cada una de las cucharas y apartarlas por si fueran necesarias, incluso en el caso de que se efectuara análisis metalográfico en lugar de ensayos mecánicos.

En el caso de que las piezas hayan de sufrir tratamiento térmico, los bloques-quilla acompañarán a aquéllas en el tratamiento. Si las piezas se van a utilizar en estado bruto de colada, la relación de propiedades de la pieza y su ba-

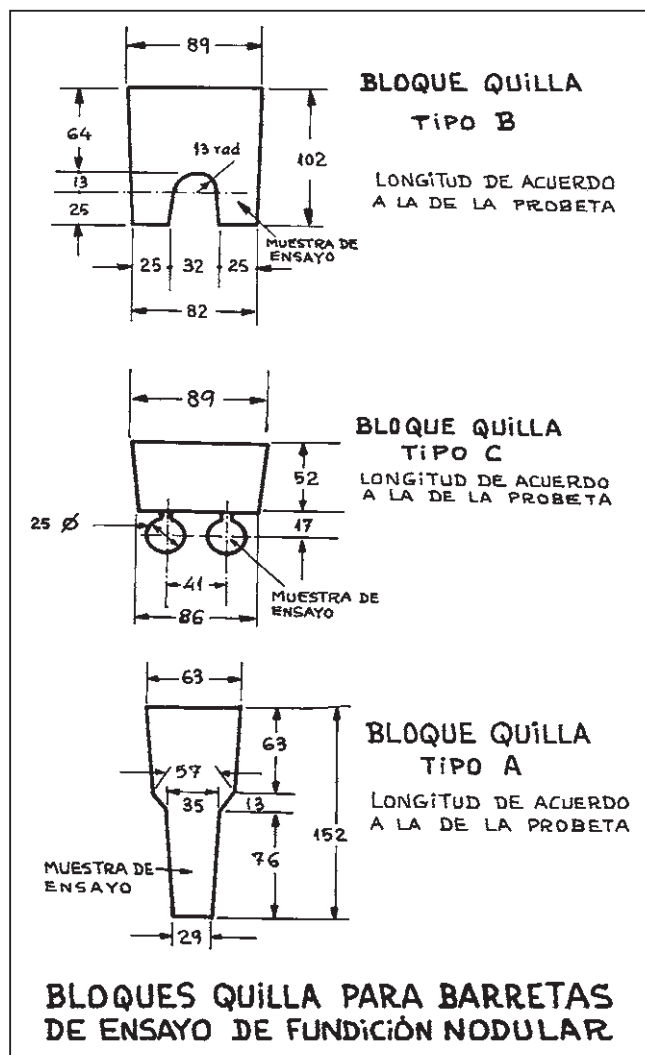


Figura 113.

retta de ensayo depende de la relación de velocidades de enfriamiento de ambos elementos. Puede ser conveniente mecanizar probetas a partir de la propia pieza para conocer la diferencia entre éstas y las obtenidas de la quilla. Las dimensiones de la probeta normalizada para ensayo de resistencia se dan en la figura 114.

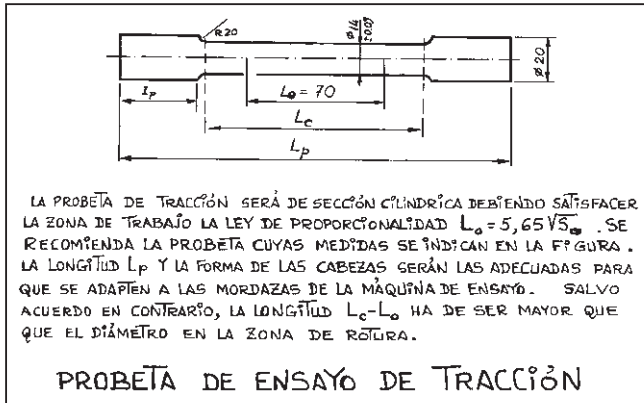


Figura 114.

En piezas de sección delgada y gran velocidad de enfriamiento, y en comparación con muestras obtenidas de bloques-quilla, las propiedades de tracción, dureza y tendencia a la formación de carburos aumentan, mientras que las de ductilidad y tenacidad disminuyen. Sin embargo, cuando se desea, pueden colarse muestras especiales para simular las propiedades que se darían en zonas específicas de las piezas coladas.

Ensayo de dureza de las piezas:

Debe ensayarse la dureza de las piezas de forma aleatoria en puntos específicos. Los valores de dureza deben caer dentro del intervalo especificado. Pueden relacionarse con los de resistencia a la tracción mediante el empleo del factor K. El cálculo de la relación entre la resistencia a la tracción y la dureza Brinell es una forma de expresar la calidad de una fundición nodular:

$$K = \frac{\text{Resistencia a la tracción}}{\text{Dureza Brinell}}$$

Por ejemplo, una fundición nodular de buena calidad, en bruto de colada o recocida, que tiene una resistencia a tracción de 60 kg/mm<sup>2</sup> (~ 600 Mpa) y 200 unidades de dureza Brinell, presentará un factor K de calidad de  $600 / 200 = 3$ , valor que será mayor en fundiciones normalizadas. Las desviaciones de estos valores pueden ser debidas a diferentes causas. Entre ellas están la aparición de carburos, grafito vermicular, grafito laminar, flotación de carbono, probetas de ensayo defectuosas y resultados incorrectos de las lecturas de resistencia a la tracción y dureza Brinell.

Inspección visual de piezas:

Deben inspeccionarse visualmente las piezas para detectar grietas, arena metalizada, uniones frías, defectos de

contracción, sopladuras, etc. Es aconsejable fijarse en la fractura cuando se desmocha el sistema de colada para asegurarse que es gris.

Equipos especiales de control:

Actualmente, al ser cada vez más estrictas y sofisticadas las aplicaciones de las piezas de fundición con grafito esferoidal también son más duras las exigencias de calidad; esto ha motivado la utilización de equipos especiales. Así, están rayos X y gammagrafía para detección de defectos internos, y Magnaflux y Magnaflow para localizar defectos superficiales en piezas. El equipo de inspección sónica y de ultrasonidos permite determinar el porcentaje de grafito nodular existente en las piezas y la posible presencia de defectos internos. Este equipo de control puede automatizarse y adaptarse a líneas de alta producción.

Determinación eutéctométrica del grado de nodularidad:

La interpretación de las curvas del enfriamiento hasta solidificación total de una fundición aporta datos bastante fiables sobre el grado de nodularidad de la misma. Las fundiciones hipereutécticas tratadas con magnesio presentan una joroba o repunte en la detención eutéctica de la curva de enfriamiento. Esta joroba va siendo menos pronunciada a medida que declina el carácter nodular del grafito (figura 115). Este procedimiento de control introduce una dificultad

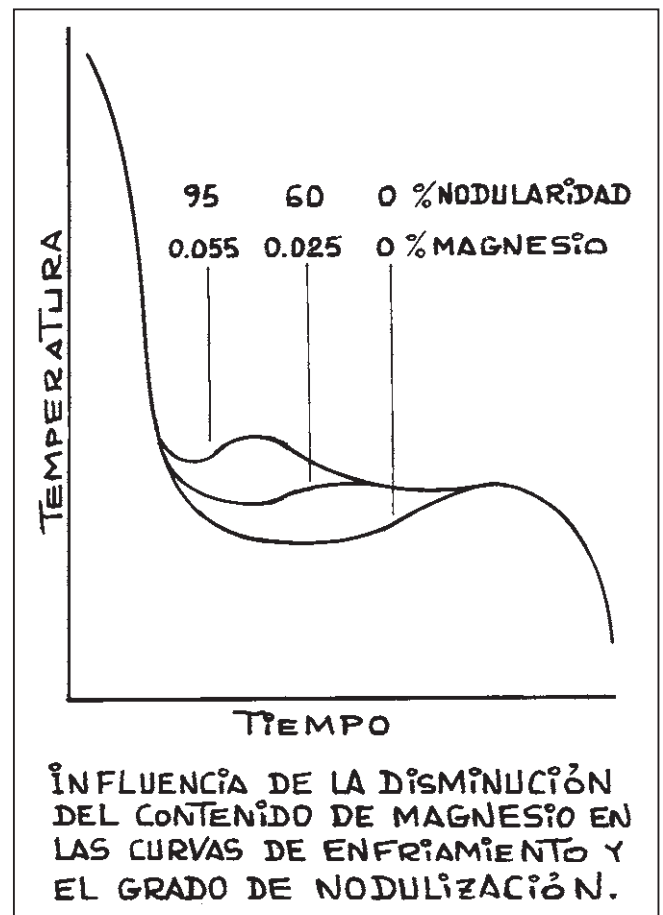


Figura 115.



tad general derivada del hecho de que los métodos prácticos de nodulización e inoculación varían de un taller a otro. Por ello, se necesita tener una serie de curvas de control de enfriamiento para cada fábrica y método de trabajo.

En la actualidad, esta técnica de control se ha puesto a punto y optimizado, de manera que existen moldes y aparatos de diversas marcas que permiten determinar la nodularidad con rapidez y seguridad (Leeds&Northrup, Electronite..).

### 7.3. DEFECTOS EN PIEZAS MOLDEADAS

Además de los defectos comunes a las fundiciones de hierro, el nodular es susceptible de presentar otros específicos. En algunos casos, el origen de ellos no está claro y hay opiniones contradictorias. Cuando se tratan las causas de los defectos en fundición nodular deben estudiarse todas las ramificaciones y circunstancias que rodean las prácticas de tratamiento del líquido, sistemas de colada y proceso de moldeo. A continuación se revisan las causas y remedios de algunos.

#### 7.3.1. Flotación de carbono

Cuando se supera el límite de solubilidad del carbono en la fundición líquida, los nódulos de grafito en exceso flotan hasta la parte más alta de la pieza líquida en solidificación. Esta circunstancia da lugar a la "fractura negra" de las piezas, en la cual aparece un contenido de carbono de 5,0 a 6,0%, lo cual provoca una pérdida de más del 50% de las características mecánicas de la pieza obtenida, disminución cuya cuantía aumenta con el exceso de carbono presente. Hay tres factores específicos que van asociados a la aparición de este defecto en las piezas de fundición nodular:

- Carbono equivalente.
- Espesor de la pieza.
- Velocidad de solidificación.

La fundición nodular es básicamente una aleación eutéctica. Cuando se encuentra en condiciones de equilibrio, con un 4,3 de carbono equivalente, se forma un nódulo en cada célula eutéctica que da lugar a una distribución más o menos homogénea de los nódulos de grafito presentes. Si el material considerado es una fundición hipereutéctica, cuyo carbono equivalente ( $CE = CT + 0,31 Si$ ) supera el 4,3 del punto de eutexia, el número de nódulos de grafito formados excede el de células eutécticas disponibles.

En estas condiciones, y permaneciendo líquida la fundición un tiempo suficiente, los nódulos de grafito en exceso ascienden hasta la parte más alta de la pieza y flotan en su superficie. Su migración ascendente puede quedar frenada por los machos internos y quedar retenidos, por tanto, en la zona solidificada adyacente a la cara inferior de los mismos. En el caso de piezas delgadas (5 a 10 mm), que solidifican rápidamente, puede tolerarse fundición hipereutéctica porque los esferoides de grafito no tienen

tiempo de flotar hasta la superficie superior. Es notorio que estas composiciones coinciden con las necesarias para evitar formación de carburos en piezas delgadas.

En el intervalo medio de espesores (10 a 35 mm) es muy probable la flotación una vez se supere el 4,5 de carbono equivalente. Piezas gruesas (más de 100 mm de espesor) que enfrían muy lentamente no deben superar el 4,3. En las tablas 1 y 2, y en las figuras 11, 18, 19 y 20 se dieron ideas sobre composiciones correctas de fundición nodular.

#### 7.3.2. Grafito estallado:

Es uno de los tipos más comunes de grafito defectuoso y su origen es aproximadamente el mismo que el de la flotación vista en el epígrafe anterior: Valores de CE superiores a 4,5, sobretreatmento con magnesio en presencia de un exceso del 0,02% de tierras raras y tiempo largo de solidificación debido a espesor de piezas. En ciertos casos el grafito estallado es el precursor del grafito rechoncho ("chunky") en piezas de gran sección.

#### 7.3.3. Carburos

Este defecto de fundición abarca una amplia variedad de condiciones que van desde la presencia de unos pocos carburos dispersos en la matriz, hasta la ausencia total de grafito en una matriz de carburos. Algunas piezas pueden recuperarse por tratamiento térmico. Medidas a tomar para evitar o minimizar la presencia de carburos en piezas de nodular pueden ser:

- Ajustar la composición química.
- Modificar el proceso de inoculación.
- Actuar sobre la operación de fusión.
- Analizar presencia de estabilizadores de carburos.

Hay una forma de carburos que se llama de "centerline" o "temple inverso". Este defecto se da en piezas que solidifican rápidamente y siempre en la zona de última solidificación. En la misma pieza aparecen carburos en otras zonas debido a enfriamiento rápido e inoculación insuficiente. El estudio por microanálisis de estas zonas ha mostrado que tienen cantidades relativamente altas de elementos residuales como cromo, molibdeno, vanadio, níquel, manganeso y cobre.

Un remedio puede ser la ausencia total, en la carga fría del horno, de chatarras de compra no controladas y que podrían contener esos elementos; en casos extremos puede recurrirse a cargas compuestas exclusivamente por Sorelmetal y retornos propios. Otra medida a tomar puede ser la inoculación en el molde, disponiendo una pequeña cantidad (2 a 5 g) de ferrosilicio del 75% en la base de la caña del bebedero o intercalándola en el canal distribuidor entre bebedero y ataques.

Pueden aparecer también carburos en borde de grano en piezas muy gruesas con CE relativamente bajo y contenidos al-

tos de Mn, Cr y Mo. Estos elementos, estabilizadores de carburos, tienden a segregarse en forma de retículo de carburos. El problema puede minimizarse introduciendo 1 a 2% de níquel o, por supuesto, impidiendo la presencia de los estabilizadores de carburos. La inoculación en el molde ayuda también a anular la formación de este tipo de carburos.

#### 7.3.4. Grafito laminar

La presencia, incluso en proporción pequeña, de grafito laminar puede deteriorar el conjunto de las características mecánicas de las piezas de fundición con grafito esferoidal hasta el punto de hacerlas defectuosas. Grafitos laminares o vermiculares van asociados a un magnesio residual (retenido) insuficiente, normalmente menor del 0,03%, o por la presencia de elementos traza perjudiciales como Bi, Pb, As, Sb, Sn, etc., especialmente en piezas de gran sección. A veces se produce reacción de la fundición líquida con materiales del molde ricos en azufre (polvo de hulla, algunos aglomerantes) o de carácter ácido (sílice), dando por resultado la disminución de magnesio residual citada anteriormente. Posibles medidas correctoras serían, entre otras:

- Revisar la metodología de fusión y pretratamiento, eliminando de la carga fría las chatarras y retornos aportadores de elementos perjudiciales, y desulfurando la fundición si procede de cubilote.
- Vigilar el equipo y la operación en el tratamiento nodulizador aumentando, si fuera necesario, la cantidad de aleaciones de magnesio a fin de llegar a un valor mayor del magnesio residual.
- Prever la presencia adicional de tierras raras en el nodulizante para anular la acción perjudicial de elementos traza posiblemente presentes en el caldo.
- Investigar la presencia de azufre excesivo en los materiales de molde y machos.

Otra forma indeseable de grafito es el que se llama "chunky" o "rechoncho", que influye desfavorablemente sobre las características mecánicas, especialmente ductilidad y resistencia al impacto. Este defecto va asociado siempre a zonas gruesas de piezas pesadas de solidificación lenta y es visible a simple vista en corte reciente con sierra de estas zonas gruesas. El mecanismo causante de la formación de grafito chunky no se conoce con fiabilidad, aunque parece que además de la velocidad de solidificación influye también la presencia de elementos subversivos.

Los ensayos llevan a la conclusión de que este grafito se encuentra en los centros térmicos de las piezas. Especialmente en aquéllas en las que la solidificación se da a muy baja velocidad y con un gradiente térmico muy escaso durante la misma. En consecuencia, un posible remedio a estos problemas sería la colocación de enfriadores externos incrustados en las paredes de la cavidad de fusión del molde, a fin de trasladar el centro térmico de la pieza hacia la superficie, con el consiguiente aumento de ese gradiente térmico.

También parece haber influencia deletérea de la sobre-nucleación, por lo que una medida a tomar sería disminuir la cantidad de nódulos de la fundición obtenida. Por ello, medidas a tomar serían:

- Sobrecalentar el hierro base por encima de 1.510 °C.
- Mantener el hierro base largo tiempo a más de 1.480 °C.
- Inocular con cantidades mínimas (0,10 a 0,25%) de FeSi.

Además de esto, el contenido de silicio debe mantenerse entre 1,00 y 2,00% lo que, aún con enfriamiento lento de piezas gruesas puede dar lugar a formación de carburos. Este problema se minimiza disminuyendo el contenido de manganeso en el hierro base.

Los análisis puntuales han mostrado que en las zonas en que se presenta grafito chunky el contenido de magnesio es muy bajo, debido al desvanecimiento originado a su vez por el largo tiempo de solidificación. Esto se corregiría aumentando la adición de magnesio. Se ha visto también que este defecto va asociado a la presencia de cantidades relativamente altas de cerio y otras tierras raras segregadas en las últimas zonas que solidifican en piezas masivas. Este problema se corrige mediante adiciones de 0,001% de antimonio o 0,020% de estaño.

#### 7.3.5. Inclusiones por escoria

Los productos de la combinación del magnesio con oxígeno y azufre, además de la subsiguiente reacción con los refractarios silicatados de la cuchara, o los residuos procedentes de tratamientos anteriores, son las bases para la formación de escoria ("dross"). Como el magnesio está siendo continuamente rechazado por el caldo y se oxida en su superficie, el dross es probablemente el defecto más frecuentemente encontrado en piezas de nodular, especialmente en piezas gruesas y fundiciones claramente hipereutécticas.

El dross se manifiesta en forma de grieta. Aparece un pliegue o unión fría causado por una película delgada de escoria; en casos extremos se hacen visibles las arrugas en la superficie de las piezas en un defecto que se denomina como "piel de elefante". Puede decirse que, en mayor o menor grado, todas las fundiciones nodulares obtenidas por introducción de nodulizante en el caldo presentan grietas o uniones frías en las superficies superiores de las piezas que aparecen al efectuar inspección por Magnaflux o Magnaflow. Estas inclusiones alargadas pueden causar serios problemas en piezas que han de trabajar a elevadas presiones hidráulicas, válvulas de control y bombas que pueden fallar debido a cavitación o erosión.

Es indudable que los defectos relacionados con escoria dross pueden aparecer en grados y formas diversos. Hay varias causas que pueden coadyuvar a este defecto:

- Altos valores de magnesio residual.
- Colada excesivamente lenta y fría.
- Sistema de colada que provoca flujo turbulento.

- Contenido de silicio superior a 2,70%.
- Fundiciones muy hipereutécticas.
- Mantenimiento de la cuchara con fuerte inclinación.

Medidas a tomar para evitar estos defectos pueden ser:

- Reducir drásticamente la cantidad de magnesio nodulizante sustituyéndolo por ferrosilicio al 10% de cerio, siliciuros de tierras raras o mischmetal.
- Introducir fundentes de criolita ( $\text{Na}_2 \text{Al F}_6$ ) y fluoruro sódico en las cucharas en proporciones de 0,5 a 1,0%. Las cucharas deben ser espumadas completamente antes que el caldo entre en el molde.
- Emplear sistemas de colada que garanticen un flujo tranquilo del metal en los moldes.

El empleo de fundentes de cobertura basados en sales de magnesio y espato flúor cálcico ayudará algo a retrasar las reacciones perniciosas, pero a costa del riesgo de introducir más inclusiones no metálicas. El espato flúor mejora la recuperación del magnesio. Jamás se resaltarán suficientemente la importancia de la limpieza de las cucharas, especialmente cuando se precisa efectuar un cierto número de tratamientos consecutivos con magnesio. Las características esenciales de la técnica reductora del riesgo de espuma, son: limpieza del revestimiento refractario de la cuchara, mínimo contenido inicial de azufre (menor que un 0,02% antes del tratamiento), menor adición posible de magnesio y en consonancia con el contenido residual previsto para el final de la colada.

La adopción de materiales básicos o neutros para el revestimiento refractario de la cuchara, es una buena ayuda para minimizar tanto los problemas de espuma como los de desvanecimiento del magnesio. La utilización de cucharas siderúrgicas de buza-tapón (figuras 116 y 117), sistema no muy normal en taller de fundición de hierro (pese a que la fundición nodular se parece en muchos aspectos al acero moldeado) es muy ventajosa, hasta el extremo de que puede hacer desaparecer los problemas de espuma y desvanecimiento.

En la actualidad este artificio de cierre por el fondo con tapón ha sido sustituido por el de corredera (figura 118) accionado por volante o por un cilindro neumático o hidráulico, método que evita la necesidad de tener permanentemente sumergido en el caldo el tapón y su sistema de accionamiento. Aún más modernas son las buzas tipo revólver, que consisten en un disco cerámico refractario que presenta a la salida del caldo alternativamente orificios y zonas ciegas, también con accionamiento mecanizado.

Con cualquiera de los tipos de cuchara de descarga por el fondo hay un punto muy sencillo, pero importante, a vigilar con el fin de asegurar un uso largo repetido sin cambiar el cierre o válvula: Es conveniente asegurarse de que, por lo menos, queden 25 - 30 mm de altura de caldo en el fondo de la cuchara cuando se vierte a la última cuchara de colada, antes de volver a llenar para un nuevo tratamiento.

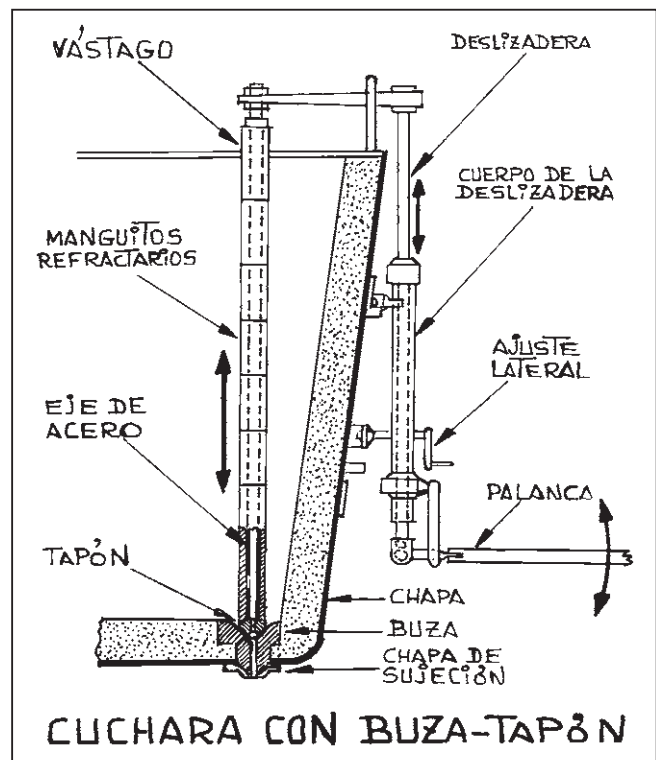


Figura 116.

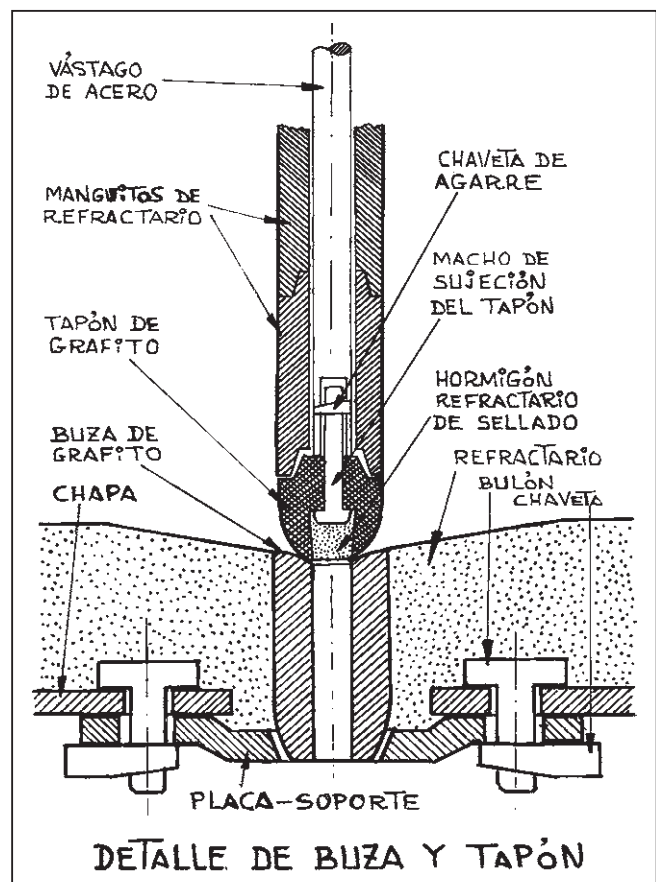


Figura 117.

### 7.3.6. Microporos ("pinholes")

La aparición de pinholes en piezas de fundición gris y nodular ha sido durante mucho tiempo una fuente signi-



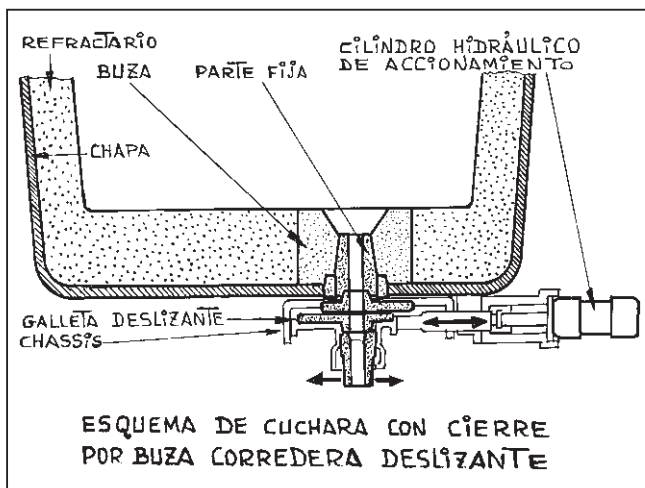


Figura 118.

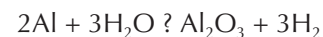
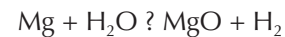
ficativa de rechazos en fundiciones comerciales, rechazos cuya cuantía en nodular es un 50% mayor que en laminar. Los pinholes se clasifican normalmente en función del gas que se supone causante: magnesio vapor, hidrógeno, nitrógeno, monóxido de carbono y la acción sinérgica de hidrógeno y nitrógeno.

Temperaturas de colada inferiores a 1340 °C aumentan drásticamente la incidencia de los pinholes en las piezas nodulares. Las zonas que rodean estos pinholes suelen ser perlíticas y con trazas de carburos en la matriz. Este tipo de pinhole puede estar asociado con colada de metal frío e imposibilidad de que los gases y vapor de magnesio atrapados escapen de la fundición. La aparición de estos defectos puede minimizarse aumentando la temperatura de colada del caldo y añadiendo hasta un 0,02% de tierras raras para aumentar la fluidez de la fundición después del tratamiento. Este aumento de fluidez ayuda a que los gases escapen con facilidad del baño de fundición.

Hidrógeno y nitrógeno no suelen incorporarse al hierro base durante la fusión pero, si así ocurriera, el hervido provocado por el tratamiento con magnesio los elimina del baño. Las fundiciones nodulares tratadas con magnesio contienen aproximadamente 2 ppm (0,0002%) de hidrógeno y hasta 80 ppm (0,0080%) de nitrógeno. Cuando este caldo se cuele en un molde de arena sintética en verde aglutinada con un 5% de bentonita y 3,0% de humedad la probabilidad de aparición de pinhole es muy pequeña. Sin embargo, un aumento del contenido de humedad hasta llegar a ser 4 a 6% dará lugar a fuerte tendencia al desarrollo de este defecto. Ha de tenerse en cuenta que esta invasión de hidrógeno no sólo puede provenir de humedad de la arena, ya que un refractario de horno o cuchara insuficientemente seco puede ser también causa de los defectos.

La presencia de cantidades crecientes de elementos fuertemente oxidables, como magnesio y aluminio, puede dar lugar a pinhole por dos razones principales. En primer lugar, aumenta drásticamente la reacción generadora de hidrógeno. Como estos elementos son acti-

vos promotores de burbujas de gas, da lugar a un aumento de la severidad del pinhole por reacción de ellos con el vapor de agua aportado por el molde:



Hay que tener presente que el aluminio es el más potente promotor del hidrógeno, por lo que hay que poner máximo interés en evitar que los materiales de la carga fría contengan cantidades sustanciales de este metal. Los óxidos estables que se originan en estas reacciones, así como la presencia de partículas de silicato de magnesio, actúan como centros nucleadores de burbujas de gas con lo que se aumenta la severidad del pinhole de hidrógeno. La influencia del aluminio sobre el pinhole en moldes de arena húmeda llega a ser muy severa para contenidos de 0,045 a 0,060%. Cuando el aluminio está presente en cantidades que se aproximan al 0,010%, la severidad es mínima.

Los pinholes de hidrógeno pueden ser de forma esférica u ovoide y normalmente aparecen inmediatamente debajo de la piel de la pieza. Como regla general, estos poros de hidrógeno asociados a arena húmeda tienen un interior liso recubierto de una película cristalina de grafito. En la microestructura de la zona aledaña al poro suele haber un anillo de ferrita que contiene grafito vermicular y laminar.

Medidas a tomar para minimizar la formación de poros de hidrógeno son:

- Aumentar el contenido de carbón en la arena de moldeo hasta ser del 6 al 8%.
- Evitar exposición del caldo a la humedad después del tratamiento con Mg.
- Emplear moldes secos.
- Colar a temperatura más altas y ventear el molde para que escapen los gases.
- Adicionar de 4 a 10 g de telurio por cada 100 kg de metal tratado.
- No dejar que el contenido de aluminio supere el 0,040% en el metal tratado.
- Las adiciones de metales de las tierras raras reaccionan también con hidrógeno y nitrógeno minimizando la formación de pinhole.
- Eliminar de la arena de moldeo, si es posible, los materiales generadores de hidrógeno como al aglutinante cereal y la harina o serrín de madera.

La otra fuente importante de porosidad de gas en las piezas de nodular es el nitrógeno transmitido por los aglomerantes de machos y moldes, algunos de los cuales son:

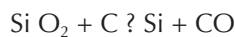
- Resina de fenolformaldehído utilizada para machos de cáscara (Shell).
- Resina furánica empleada en machos de caja caliente (Hot Box).



— Resina furánica para moldes y machos de fraguado al aire (Air Set).

Los poros de nitrógeno en piezas de nodular tienen forma esférica o irregular y su interior suele ser color gris mate. Se encuentran en la zona de la pieza adyacente al molde o macho con aglomerante nitrogenado cuando el contenido de nitrógeno en la fundición alcanza 130 ppm (0,0130%). Como puede suponerse, la forma más efectiva de eliminarlos es empleando en moldes y machos aglomerantes libres de nitrógeno. Otra medida puede ser añadir 0,02% de tierras raras o 0,10% de aluminio, aunque ha de tenerse presente que la introducción de aluminio tiende a deteriorar la forma de los esferoides de grafito.

Otra fuente de poros son las burbujas de monóxido de carbono formadas por la reducción de escorias de silicato y óxido de magnesio por el carbono aportado por la propia fundición líquida o por el material carbonáceo presente en la arena aglutinada de moldeo:



Este tipo de poro esférico aparece usualmente en isletas en la posición de colada más elevada de la pieza, es decir, la zona en la que se acumulan las inclusiones de escoria. La causa de estos poros suele ser un sobre-tratamiento con aleaciones de ferrosiliciomagnesio obligado por partir de un hierro base con elevados contenidos de azufre u óxido. Para disminuir o eliminar estos pinholes es favorable la adición de 4 a 10 g de telurio por cada 100 kg de caldo.

### 7.3.7. Contracción

Durante los últimos momentos de la solidificación se produce la contracción esponjosa o interdendrítica que puede compensarse o eliminarse si a la vez se forman cantidades adecuadas de grafito. Esto es muy importante en piezas que tienen zonas a las que es difícil alimentar eficientemente. En la figura 11 vista anteriormente se evidencia la importancia de mantener relaciones mutuas correctas de carbono y silicio que favorezcan la formación de suficiente cantidad de grafito. La recta cuya ecuación es

$$\% \text{ Carbono} + \frac{\% \text{ Silicio}}{7} = 3,90$$

limita el intervalo de composición química que produciría piezas sanas. Evidentemente, esta fórmula se desvía de la del carbono equivalente en el rango superior de silicio, ya que la influencia de este elemento es la séptima parte de la del carbono en lugar de un tercio que figura en el cálculo del carbono equivalente CE. Esta circunstancia es muy importante en la obtención de piezas nodulares en moldes de arena seca o atacados a mano sin mazarotaje.

La contracción aumenta cuando disminuye la temperatura de colada. Es más pronunciada en piezas de espesor pequeño y medio. Depende de la relación entre superficie y volumen (módulo de enfriamiento), relación que determina la veloci-

dad de enfriamiento del metal una vez lleno el molde. Cuando el descenso de la temperatura del metal lleva a éste a menos de 1.260 °C comienza la precipitación del grafito. Si la cavidad de molde aún no se había llenado totalmente, se desperdicia el efecto favorable del aumento de volumen provocado por la precipitación del grafito, lo cual genera contracción excesiva. Por otra parte, un enfriamiento excesivo originado por llenado muy lento o sistemas de colada no favorables también puede dar lugar a contracción.

Es muy importante que la cavidad de molde esté llena antes que la temperatura del líquido descienda a 1.260 °C; por otra parte, la distribución del metal ha de ser tal que haya gradiente de temperatura lo más uniforme posible. La falta de constancia de resultados de un día a otro (o, incluso, de una cuchara a otra) puede ser indicio de que la temperatura de colada está demasiado próxima a la línea divisoria y que, en consecuencia, debe elevarse.

Puede ocurrir que haya que disponer mazarotaje o enfriadores en zonas aisladas o masivas pues de lo contrario éstas actuarían como alimentadores de las zonas más delgadas, especialmente en piezas moldeadas en arena aglutinada y en verde. Los problemas de contracción se eliminarían también aumentando la resistencia en caliente de la arena de moldeo y la dureza de atacado del molde, así como colando el caldo con más velocidad y a más de 1.260 °C.

### 7.3.8. Sobre-tratamiento con magnesio

Un exceso de magnesio en el tratamiento nodulizador, que resulte en la obtención de fundiciones nodulares con más de 0,060% de magnesio residual, acaba siendo una de las más acusadas y peor entendidas causas de piezas defectuosas. El intervalo ideal de magnesio residual es de 0,035 a 0,045%, si bien hoy día se tiende a llegar a valores aún más bajos que los comprendidos en ese margen. Este sobre-tratamiento con aleaciones de magnesio puede dar lugar a problemas como:

- Magnesios residuales superiores a 0,050% favorecen la aparición excesiva de escorias o dross de óxido y silicato de magnesio. Por otro lado, pueden dar lugar a flotación de carbono, defecto estudiado anteriormente.
- Contenidos del orden de 0,080% o superiores determinan la formación de nódulos de grafito en forma de cangrejo o espiga. Si el contenido de magnesio es aún mayor aparecen zonas de grafito laminar con extremos puntiagudos.
- El magnesio añadido a la fundición es un potente estabilizador de carburos. Si el contenido supera el 0,06% suele ocurrir que se generen carburos que no pueden eliminarse por inoculación o tratamiento térmico posterior.
- Exceso de magnesio puede también dar lugar a formaciones de pinholes erróneamente atribuidas a aluminio u otras causas.