

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingenierfa  
Geológica Minera y Metalúrgica



TECNOLOGIA DE LA FUNDICION

NODULAR

T E S I S

Para Optar El Título Profesional de

INGENIERO METALURGISTA

HUGO EUSEBIO GRANADOS RIVAS

PROMOCION 77-II

LIMA - PERU

1 9 9 2

A MIS PADRES

Por todo su dedicación y  
sacrificio realizado para  
culminar mis estudios.

## INDICE

	Pag.
CAPITULO I .- INTRODUCCION	
1.1. Exposición de motivos	3
1.2. Generalidades	4
1.3. Teoría de la fundición nodular	4
CAPITULO II .- PROPIEDADES DE INGENIERIA Y CONSTANTES FISICAS DE LA FUNDICION NODULAR	
2.1. Introducción	8
2.2. Propiedades mecánicas	9
2.3. Propiedades magnéticas	25
2.4. Propiedades eléctricas	26
2.5. Propiedades diversas	26
2.6. Esfuerzos de diseño	29
2.7. Características y aplicaciones	29
CAPITULO III .- METALURGIA DE LA FUNDICION NODULAR	
3.1. Diagrama de equilibrio Fe-C y Fe-C-Si	34
3.2. Por qué grafito esferoidal?	41
3.3. Clasificación de la fundición nodular	42
3.4. Grafito esferoidal - Microestructuras	45
3.5. Influencia de los elementos primarios en la fundición nodular	50
3.6. Influencia de los elementos nodulizantes	63
3.7. Influencia de los elementos aleantes	71
3.8. Influencia de los elementos residuales	79
3.9. Influencia de los elementos que promueven la perlita y carburos	86
3.10 Influencia de los gases	89
CAPITULO IV .- FUSION Y TECNICAS EMPLEADAS EN LA PRODUCCION DE LA FUNDICION NODULAR	
4.1. Fusión en cubilote ácido	94
4.2. Fusión en cubilote de escoria básica	97
4.3. Fusión en cubilote refrigerado con agua	105
4.4. Controles del metal fundido	119
4.5. Cálculo para una colada de fundición nodular	122
4.6. Fusión en horno eléctrico de arco directo	126
4.7. Fusión en horno eléctrico básico de arco directo	131
4.8. Fusión en horno eléctrico de arco indirecto	131
4.9. Fusión en horno de inducción de frecuencia de línea sin núcleo	134
4.10 Fusión en horno de inducción del tipo de canal	140
4.11 Fusión en hornos de reverbero	144
4.12 Proceso Duplex	144
CAPITULO V .- SELECCION DE LOS MATERIALES DE LA CARGA	
5.1. Sorel metal	146
5.2. Retorno de fundición nodular	147
5.3. Chatarra de acero	147

5.4. Coque	148
5.5. Fundente piedra caliza	148
5.6. Fluorita - Fundente suplementario	149
5.7. Adición de silicio a la carga	149
5.8. Manganeso	150
5.9. Níquel	150
5.10 Cobre	151
CAPITULO VI .- PREACONDICIONAMIENTO Y DESULFURIZACION	
6.1. Desoxidación	154
6.2. Preacondicionamiento previo al tratamiento con magnesio	154
6.3. Desulfurización	155
CAPITULO VII .- TRATAMIENTOS DE NODULIZACION	
7.1. Cálculo del % de magnesio requerido	164
7.2. Tratamientos de nodulización	166
- Proceso sobre el vaciado	167
- Método sandwich	170
- Método del émbolo	174
- Método de inyección	182
- Método de la cámara de presión	183
- Método de la cuchara sellada	185
- Método del tapón poroso	185
- Tratamiento en el flujo	198
- Proceso inmold	200
- Proceso del convertidor Fisher	205
Equipo de tratamiento especial con magnesio coque	208
- Proceso Pont-A-Mousson o M.A.P.	210
CAPITULO VIII.- INOCULACION EN LA PRODUCCION DE LA FUNDICION NODULAR	
8.1. Factores que influyen en la formación de carburos	215
8.2. Tipos de inoculantes	215
8.3. Técnicas especiales de inoculación	218
- Sistema de cuchara simple	218
- Reinoculación	219
- Doble inoculación	220
- Inoculación en el molde	220
8.4. Pérdida de la inoculación	221
CAPITULO IX - PROPIEDADES DE FUNDICION	
9.1. Contracción de la fundición nodular	223
9.2. Manipuleo del metal	226
9.3. Moldeo	228
9.4. Diseño del sistema de alimentación	230
9.5. Diseño de risers	239
CAPITULO X - INFLUENCIA DEL TAMANO DE SECCION SOBRE LA MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECANICAS DE LA FUNDICION NODULAR	
10.1. Efecto del tamaño de la sección sobre la velocidad de solidificación	243
10.2. Efecto de la pieza fundida sobre la velocidad de	

enfriamiento	246
10.3. Influencia de la velocidad de solidificación sobre la cantidad de nódulos	248
10.4. Control de la composición de la fundición nodular en bruto de colada vs tamaño de sección	251
10.5. Propiedades mecánicas, en bruto de colada vs tamaño de sección	251
10.6. Propiedades de piezas tratadas térmicamente vs tamaño de sección	252
10.7. Producción de fundición nodular de paredes delgadas, en bruto de colada	252
CAPITULO XI .- TRATAMIENTOS TERMICOS	
11.1. Enfriamiento en el molde	257
11.2. Alivio de tensiones	258
11.3. Ferritizado subcrítico	258
11.4. Descomposición del carburo	259
11.5. Descomposición de la perlita	263
11.6. Influencia de la masa en el tratamiento térmico	266
11.7. Recocido	266
11.8. Normalizado	267
11.9. Normalizado y revenido	267
11.10 Fragilidad de revenido	268
11.11 Templado y revenido	268
11.12 Austempering	272
11.13 Endurecimiento superficial	273
11.14 Tratamiento térmico para las fundiciones nodulares austeníticas	276
11.15 Crecimiento	278
11.16 Efecto de la velocidad de enfriamiento en el molde y tratamientos térmicos sobre las propiedades mecánicas	278
CAPITULO XII .- DEFECTOS EN LAS PIEZAS FUNDIDAS DE FUNDICION NODULAR	
12.1. Flotación del carbono	283
12.2. Grafito explotado	285
12.3. Carburos	287
12.4. Grafito laminar	289
12.5. Formación de grafito chunk	290
12.6. Inclusiones de óxidos (dross)	292
12.7. Pinholes	293
12.8. Contracción	299
12.9. Sobretratamiento con magnesio	301
CAPITULO XIII.- CONTROL DE CALIDAD DEL PROCESO DE LA FUNDICION NODULAR	
13.1. Inspección del material usado en el proceso de fundición nodular	304
13.2. Cargas en el horno	305
13.3. Composición del fierro base	305
13.4. Mantenimiento de la temperatura constante del fierro base	306
13.5. Pesado del metal, una parte del procedimiento de tratamiento	306

13.6. Pesar todas las aleaciones e inoculantes en el tratamiento	306
13.7. Microexamen de las muestras de los tratamientos individuales	306
13.8. Análisis químico	308
13.9. Ensayo de tracción	308
13.10 Ensayo de dureza	309
13.11 Inspección visual	310
13.12 Equipos especiales	310
13.13 Determinación eutectométrica de la nodularidad del grafito	310

#### CAPITULO XIV - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### BIBLIOGRAFIA

#### ANEXOS

**C A P I T U L O   I .- INTRODUCCION**

## I.I. EXPOSICION DE MOTIVOS

El desarrollo del primer proceso para la producción de la fundición nodular fue introducido por H. Morrogh de la Asociación Británica de Investigación del Fierro Fundido (B.C.I.R.A.), en Julio de 1,946. El agente nodulizante que produjo el grafito en forma nodular o esferoidal fue el cerio; sin embargo, debido a los graves problemas de control y al alto costo, este proceso nunca se usó ampliamente.

Durante la II Guerra Mundial, cuando había poca disponibilidad de cromo, la Cia. Internacional del Níquel (I.N.CO.) ensayó sustituir el Cr por el Mg como un estabilizador de carburos en la fundición gris y en el Ni Hard; sin embargo, debido a la violenta reacción del Mg con el fierro fundido, no fue posible la adición directa del Mg. Se redujo la violencia de la reacción utilizando aleaciones de Mg-Cu y Mg-Ni. El fierro fundido obtenido poseía alta resistencia y un grado de ductilidad; la microestructura de este material reveló la presencia del grafito en forma nodular. Luego de nuevas mejoras, en Marzo de 1,947, se introdujo el proceso de la fundición nodular con Mg. Este material consiste de una matriz de acero poblada con grafito esferoidal.

La fundición nodular tiene un admirable rango de propiedades que ningún otro metal simple puede igualar. Las piezas fundidas de fundición nodular pueden producirse en secciones tan delgadas como 1/16" pesando fracciones de Kg hasta secciones superiores a 30" que pesan más de 50 ton. La fundición nodular posee la excelente colabilidad de la fundición gris combinada con mucho de la resistencia y ductilidad del acero. La matriz de fierro puede controlarse por variaciones en la composición, velocidad de enfriamiento en el molde y tratamientos térmicos, para producir resistencias a la tracción mínimas de 42 Kg/mm<sup>2</sup> con elongaciones de hasta 25% y resistencias a la tracción de 105 Kg/mm<sup>2</sup> con elongaciones de 1 a 4%.

Las piezas fundidas de fundición nodular continúan introduciéndose en el mercado a expensas de las piezas de fundición maleable perlítica o ferrítica, piezas de acero forjadas o soldadas. La fundición nodular tiene un mercado comprobado en la industria automotriz, equipos de agricultura, máquinas herramienta, construcción de equipos, piezas de la industria minera, motores Diesel, etc.



En el País, la fundición nodular se introdujo a comienzo de la década del 70 y desde entonces el tonelaje producido se ha incrementado, por el reemplazo de piezas de otros metales, principalmente de aceros ordinarios.

Dada la importancia de este material, por sus excelentes propiedades y al no contar con la suficiente información disponible para la producción de piezas fundidas de fundición nodular, es que elegí el presente tema, el cual espero contribuya a reducir el porcentaje de piezas rechazadas y a impulsar el desarrollo de nuevas fundiciones.

## 1.2. GENERALIDADES

La manufactura del fierro fundido es una industria muy antigua que data desde hace 2,000 años. La fundición gris en su forma convencional es esencialmente una aleación Fe-C-Si, que consiste de láminas de grafito en una matriz semejante a la del acero. La fundición gris es un material frágil que tiene poca o ninguna ductilidad; es normalmente blanda y maquinable con una relativa baja resistencia a la tracción, en la forma no aleada. La fundición maleable de corazón blanco y la de corazón negro, fueron desarrolladas en el siglo XVIII y XIX, respectivamente. Estos materiales se produjeron originalmente del arrabio fundido bajo condiciones oxidantes en un horno de reverbero, obteniéndose una fundición blanca o con carburos, sin láminas de grafito, bajo en C y bajo en Si. Las piezas fundidas de fundición blanca se empaquetan con mineral de Fe y se someten a un tratamiento térmico muy largo. El producto final fue un material blando y dúctil que ahora conocemos como fundición maleable. El cambio de la fundición blanca frágil, se debió a la precipitación del C a partir del  $Fe_3C$ , en colonias de grafito en una matriz de fierro.

La fundición nodular fue descubierta independientemente por la British Cast Iron Research Association (BCIRA) y la International Nickel Company (INCO). Este material consiste de esferoides de grafito dispersados en una matriz similar a la del acero.

El proceso BCIRA consiste de una adición de cerio a un fierro fundido hipereutéctico, de composición similar a la de la fundición gris. El cerio elimina el S y con 0.02% de cerio residual, produce esferoides de grafito en vez de láminas. El proceso INCO similarmente usa

adiciones de Mg a fierros fundidos hipoeutécticos o hipereutécticos. Actualmente, se emplea las adiciones de aleaciones de Mg, como agentes nodulizantes.

### 1.3. TEORIA DE LA FUNDICION NODULAR

Para explicar el mecanismo de la formación del grafito nodular, se han desarrollado 4 hipótesis principales:

- a) Nucleación a partir de inoculantes siguiendo la teoría de carburos semejante a las sales o concentraciones de alto Si, que se aplican en el caso de la fundición gris.
- b) Nucleación a partir de la adición de nodulizantes tales como Mg o Ce en combinación con post-inoculantes.
- c) Nucleación dentro de las burbujas de vapor de Mg e ignorando el efecto de los post-inoculantes.
- d) Sitios de nucleación en partículas microscópicas de  $\text{SiO}_2$ . Estas son reducidas, por el C en el fierro, a Si y burbujas de CO. Los nódulos de grafito se forman en el interior de las burbujas.

El grafito laminar en la fundición gris se forma a lo largo del eje A o un plano horizontal; mientras que el grafito esferoidal en la fundición nodular se forma a lo largo del eje C o plano vertical. El número y efectividad de los núcleos varía. Cuando son numerosos y efectivos, ha ocurrido solamente un relativo pequeño grado de sobreenfriamiento. Cuando las partículas son pocas e inefectivas, el sobreenfriamiento aumenta. Un incremento del sobreenfriamiento tiende a producir la formación del carburo de Fe ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) antes que el grafito estable, durante la solidificación tanto en la fundición gris y fundición nodular.

Las partículas o núcleos que dan lugar a la nucleación con un mínimo de sobreenfriamiento, incluye un número de materiales. Las fuentes más efectivas de núcleos para la nucleación heterogénea del grafito en el fierro fundido, incluyen: carburos parecidos a las sales (Ca, Al, carburo de Si y Ba) de inoculantes comerciales, partículas de grafito, sulfuro que se forma durante el tratamiento con Mg y nitruro de B. También, pueden originar la precipitación de adicionales núcleos de grafito, las áreas localizadas de alto Si producidas por la adición de inoculantes de alto Si, tal como el FeSi de 75%. La post-inoculación de la

fundición nodular proporciona suficientes núcleos efectivos para la nucleación del grafito y la supresión de la formación de carburos.

El grado de inoculación o nucleación establece el número de partículas de grafito presentes en el fierro fundido, sin embargo, la forma del grafito (laminar o esferoidal) se determina, generalmente por las condiciones de crecimiento. El crecimiento del grafito como una lámina o esferoide, es considerado por muchos que se determina por una serie de factores cinéticos resultantes de la absorción e incorporación de átomos extraños superficialmente activos, en la interfase grafito-metal. El cerio y magnesio favorecen el crecimiento del grafito esferoidal en el líquido, por este mecanismo. El S libre o no combinado, el oxígeno, hidrógeno y nitrógeno favorecen el crecimiento del grafito laminar. Los elementos que promueven la formación del grafito esferoidal son: Mg, Ce, La, Ca, K, Li, Na, Be, Y. Los elementos que retardan la formación del grafito esferoidal son: S, O, H, N, Pb, Ti, As.

En la producción de la fundición nodular se tiene lo siguiente:

- 1.- La fundición nodular puede producirse de Fe electrolítico, C puro, Si elemental, fundido al vacío e inoculado con Si metálico.
- 2.- La fundición nodular se ha producido experimentalmente de coladas hechas de materiales libres de S, puros e inoculados con FeSi libre de S.
- 3.- El Fe base para la fundición nodular tratado con Mg, no inoculado, tiene una matriz de carburos con un número limitado de nódulos.
- 4.- La inoculación con una aleación base de FeSi, se requiere para eliminar los carburos de la matriz de la fundición nodular.
- 5.- La formación del grafito nodular en el fierro fundido tiene una velocidad crítica de solidificación, por debajo del cual el grafito esferoidal no se forma en presencia de cantidades adecuadas de agentes esferoidizantes o nodulizantes.
- 6.- La velocidad crítica de solidificación para la fundición nodular, controla la formación de las láminas de grafito en las piezas fundidas de fundición nodular de secciones gruesas.

C A P I T U L O    I I   .- PROPIEDADES DE INGENIERIA Y CONSTANTES  
FISICAS DE LA FUNDICION NODULAR

## 2.1. INTRODUCCION

En la actualidad existen 16 especificaciones diferentes y 32 clases de fundición nodular, usadas en los E.E.U.U. como se muestra en la Tabla 2.1. Las composiciones típicas de estos fierros se presentan en la Tabla 2.2. Estas especificaciones cubren las piezas fundidas de fundición nodular usadas en la mayoría de aplicaciones. Los rangos generales de resistencia a la tracción y dureza son especificados para cada clase de fundición nodular. Los diseñadores que especifican una clase dada de fundición nodular, no deben asumir que las propiedades de tracción estarán por arriba de las propiedades mínimas especificadas, a menos que se dispongan de datos de ensayos reales para piezas fundidas individualmente y se correlacionen con propiedades de tracción y dureza sobre barras fundidas. En los párrafos siguientes se presenta información útil para determinar las interrelaciones de las propiedades mecánicas en la fundición nodular.

Los datos generales de las propiedades mecánicas de las fundiciones nodulares ferríticas incluyen las clases 60-40-18 y 65-45-12. Este incluye fierros con resistencia a la tracción de hasta  $49.22 \text{ Kg/mm}^2$ . La información para las fundiciones nodulares perlíticas en "bruto de colada" y normalizada incluye las clases 80-55-06 y 100-70-03. Estos fierros varían de 80% de perlita a totalmente perlíticas y tienen resistencias a la tracción de  $56.25 \text{ Kg/mm}^2$  a  $70.31 \text{ Kg/mm}^2$ .

También se incluyen las fundiciones nodulares templadas y revenidas, tales como el 120-90-02. Estos fierros son tratados separadamente de la fundición nodular perlítica de alta resistencia, debido principalmente a que las fundiciones nodulares templadas y revenidas tienen como característica altas relaciones (ratios) de límite de fluencia a resistencia a la tracción. Generalmente, sus propiedades de impacto, también son superiores a las fundiciones nodulares perlíticas de similares resistencia a la tracción. En vista de que estos, normalmente, tienen características muy especiales y se usan solamente en aplicaciones específi-

TABLA 2.1.- RESUMEN DE LAS ESPECIFICACIONES DE LA FUNDICION NODULAR

Especificac.	Grado	R. a la t. mínima (Kg/mm <sup>2</sup> )	L. de f. mínima (Kg/mm <sup>2</sup> )	Elongac. en 2", %	Tratamiento térmico	Otros requerimientos					
ASTM A536-71	60-40-18	42.18	28.12	18	Puede recocerse	La composición química está subordinada a las propiedades mecánicas, sin embargo, el contenido de cualquier elemento puede especificarse por mutuo acuerdo.					
	65-45-12	45.70	31.64	12							
	80-55-06	56.25	38.67	6	Usualmente normalizado Templado y revenido						
	100-70-03	70.31	49.22	3							
	120-90-02	84.37	63.28	2							
SAE J434b	D-4018				Puede recocerse	Dureza, BHN	Microestructura				
	D-4512					170 máx.	Ferrítica				
	D-5506				Puede normalizarse Templado y revenido	156-217	Ferrítica-perlítica				
	D-7003					187-255	Ferrítica-perlítica				
	DQST					241-302	Perlítica				
					Especificado	Martensítica					
11466A	D-4018	42.18	28.12	18	Ferritizado por recocido						
	D-4512	45.70	31.64	12							
	D-5506	56.25	38.67	6							
	D-7003	70.31	49.22	3							
	DQST	Por mutuo acuerdo				Normalizado Templado y revenido					
ASTM A395-71 ASME SA395	60-40-18	42.18	28.12	18	Ferritizado por recocido BHN 143-187	Composición, %				BHN	
						Ct.	Si	P	Otros CE.		
ASTM A476-70	80-60-03	56.25	42.18	3	Se usa en bruto de colada. Debe tener una dureza mínima de 201 BHN	Mín.	3.0			3.8	
						Máx.	3.00	0.08	0.05 S	4.5	
MIL-I-24137	Clase A	42.18	31.64	15	Debe ferritizarse por un recocido para obtener una dureza máxima de 190 BHN	Mín.	3.0				
						Máx.	2.50	0.08		4.3	190
MIL-I-22243		38.67	26.01	20	Ferritizado	Máx.	2.20	0.05	0.05 Si	175	
ASTM A445-71 API 604	60-40-18	42.18	28.12	18	Tratado térmicamente para obtener una estructura ferrítica	Mín.	3.0			143	
						Máx.		2.50	0.08		187
AMS 5315		42.18	31.64	15	Recocido	Mín.	3.2	1.70			
AMS 5316		56.25	42.18	3		Máx.	4.0	2.50	0.08	0.8 Mn	190
						Mín.	3.2	1.70			202
						Máx.	4.0	2.50	0.08	0.8 Mn	269
AGMA 244.02	165 (m)	45.70	31.64	10	Recocido						
	180 (m)	49.22	38.67	7							
	210 (m)	59.76	49.22	5							
	225 (m)	62.57	52.73	4							
	255 (m)	72.42	61.17	3		Normalizado y revenido					
	265 (m)	75.23	64.68	2							
	285 (m)	80.85	70.31	1.5							
	300 (m)	86.48	73.82	1							
	350 (m)	100.54	86.48	0.5							
	180 (m)	68.90	52.73	7	Templado y revenido						
	210 (m)	73.82	57.65	6							
	255 (m)	80.85	63.28	4							
	265 (m)	84.37	66.79	3.5							
	285 (m)	91.40	73.82	3							
	300 (m)	94.92	77.34	2.5							
350 (m)	111.09	91.40	1								
AWWA C151	Tubería a presión 60-40-10	42.18	29.53	10	Impacto 0.97 Kg/mm <sup>2</sup>						

cas, la información presentada es de naturaleza general y está dirigida hacia el lado inferior de la especificación.

Los datos presentados aquí dan una cierta guía en la selección del apropiado máximo esfuerzo de diseño para aplicaciones en piezas fundidas sometidas bajo esfuerzos de tracción, esfuerzos de compresión y esfuerzos de fatiga. La información de los datos de las Tablas de este Capítulo, puede usarse para calcular el esfuerzo requerido en el diseño de piezas. Se espera que este tipo de información sea de ayuda para el fundidor obligado a trabajar con ingenieros para solucionar los problemas del diseño de piezas.

## 2.2. PROPIEDADES MECANICAS

A continuación presentamos una serie de definiciones usadas en los cálculos de resistencia de materiales.

a) RESISTENCIA A LA TRACCION.- Es el valor obtenido dividiendo la máxima carga observada durante el ensayo de tracción en el punto de rotura, entre el área de la sección transversal antes de aplicar la carga.

$$\text{Resistencia a la tracción (Kg/mm}^2\text{)} = \frac{\text{Carga (Kg)}}{\text{Area original (mm}^2\text{)}}$$

b) LIMITE DE FLUENCIA (Tensión de prueba, es el equivalente In - glés o Europeo).- Es la tensión en la que un material exhibe una desviación límite especificada, de la proporcionalidad de tensión a deformación. En los aceros blandos, la tensión en el punto en que se observa un marcado incremento en la deformación, ocurre sin un incremento en la carga aplicada, tal como se indica en la Figura 2.1.

Sin embargo, en el caso de la fundición nodular no existe un definido marcado incremento en la deformación sin un incremento en la carga aplicada. La curva tensión-deformación se hace gradualmente horizontal, sin el repentino cambio que ocurre en el caso de los aceros blandos.

TABLA 2.2.- RELACIONES DE COMPOSICION Y PROPIEDADES MECANICAS DE FUNDICIONES NODULARES NO ALEADAS Y DE BAJA ALEACION

Composición y Propiedades Mecánicas	Grado 60-40-18	Grado 65-45-12	Grado (a) 80-55-06	Grado (b) 100-70-03	Grado (b) 120-90-02
% Carbono	3.60-3.85	3.60-3.85	3.60-3.80	3.60-3.80	3.60-3.80
% Silicio	2.50-2.80	2.50-2.80	2.25-2.70	2.25-2.70	2.25-2.70
% Manganeso	0.20-0.30	0.25-0.35	0.45-0.65	0.50-0.70	0.50-0.70
% Fósforo (c)	0.05 Máx.	0.05 Máx.	0.05 Máx.	0.05 Máx.	0.05 Máx.
% Azufre	0.015 Máx	0.015 Máx	0.015 Máx	0.015 Máx	0.015 Máx
% Níquel	---	---	0.40-1.00	0.40-1.00	0.40-1.00
% Cromo	0.05 Máx.	0.10 Máx.	0.15 Máx.	0.15 Máx.	0.15 Máx.
%Cu con 0.10 Máx. %Ni	---	---	0.20-0.40	0.20-0.40	0.20-0.40
Tamaño sección, pulg.					
1/8	C 4.25 Si 2.80	C 4.25 Si 2.80	C 3.80 Si 2.80	C 3.80 Si 2.80	C 3.80 Si 2.80
1/4	C 3.95 Si 2.80	C 3.95 Si 2.80	C 3.85 Si 2.80	C 3.80 Si 2.80	C 3.80 Si 2.80
1/2	C 3.85 Si 2.80	C 3.85 Si 2.80	C 3.80 Si 2.75	C 3.75 Si 2.75	C 3.75 Si 2.75
1	C 3.75 Si 2.65	C 3.75 Si 2.65	C 3.60 Si 2.55	C 3.60 Si 2.55	C 3.60 Si 2.55
2	C 3.55 Si 2.50	C 3.55 Si 2.50	C 3.50 Si 2.25	C 3.50 Si 2.25	C 3.50 Si 2.25
3	C 3.40 Si 2.45	C 3.40 Si 2.45	C 3.40 Si 2.20	C 3.40 Si 2.20	C 3.40 Si 2.20

- (a) La F.N. Grado 80-55-06 puede producirse en bruto de colada o por un normalizado. El Grado 60-40-18 puede producirse por un recocido de ferritizado total. El Grado 65-45-12 puede producirse por un normalizado y recocido.
- (b) Los Grados 100-70-03 y 120-90-02 requieren un templado y revenido o normalizado y revenido.
- (c) Para una máxima elongación y propiedades de impacto, no debe excederse de 0.025 %P.



Por esta razón, se ha establecido un método para determinar el límite de fluencia, considerando cantidades definidas de elongación o deformación permanente, como un criterio de límite de fluencia. Este método es conocido como el "método convencional".

Por ejemplo, para obtener el límite de fluencia convencional del 0.2%, se procede como sigue:

Desde el punto que representa una deformación del 0.2%, en el eje de las abscisas (deformación), tal como se ilustra en la Figura 2.2, se traza una paralela a la porción elástica de la curva tensión-deformación. Esta línea cortará a la curva en un punto, a partir del cual el material que se está ensayando, se aparta del comportamiento elástico en un 0.2%. La tensión en este punto, es el límite de fluencia convencional.

c) LIMITE DE PROPORCIONALIDAD.- Se define como la mayor tensión que un material es capaz de desarrollar sin una desviación de la relación proporcional entre la tensión o carga y la deformación.

El límite de proporcionalidad de la fundición nodular comparada con el del acero, es excepcionalmente bajo y se acerca aproximadamente al 40% del valor de la resistencia a la tracción o un límite de fluencia convencional del 0.005%.

d) CONSIDERACIONES DE DUREZA EN LA FUNDICION NODULAR.- Se ha realizado un gran esfuerzo para establecer relaciones matemáticas entre la dureza y la tracción. Sin embargo, la información ha sido sólo de interés académico. Aún cuando, puede establecerse algún grado de correlación, sobre la base de prácticas probadas en una fundición en particular. Esto implica correlaciones de datos de resistencia a la tracción y resultados de durezas en barras de ensayo.

La dureza Brinell produce los resultados consistentes más precisos. Las durezas Rockwell "B" y "K", las cuales emplean penetradores de bolas, pueden usarse convenientemente para determinar la dureza de piezas fundidas de secciones livianas donde no

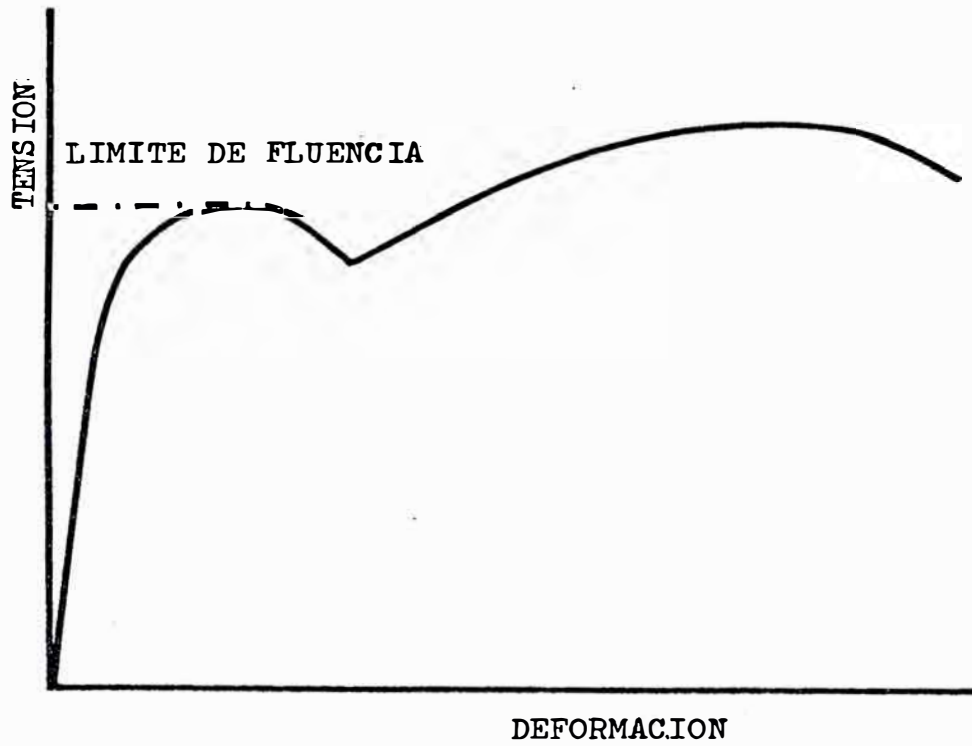


FIGURA 2.1.- Curva Tensión - Deformación, de un acero blando.

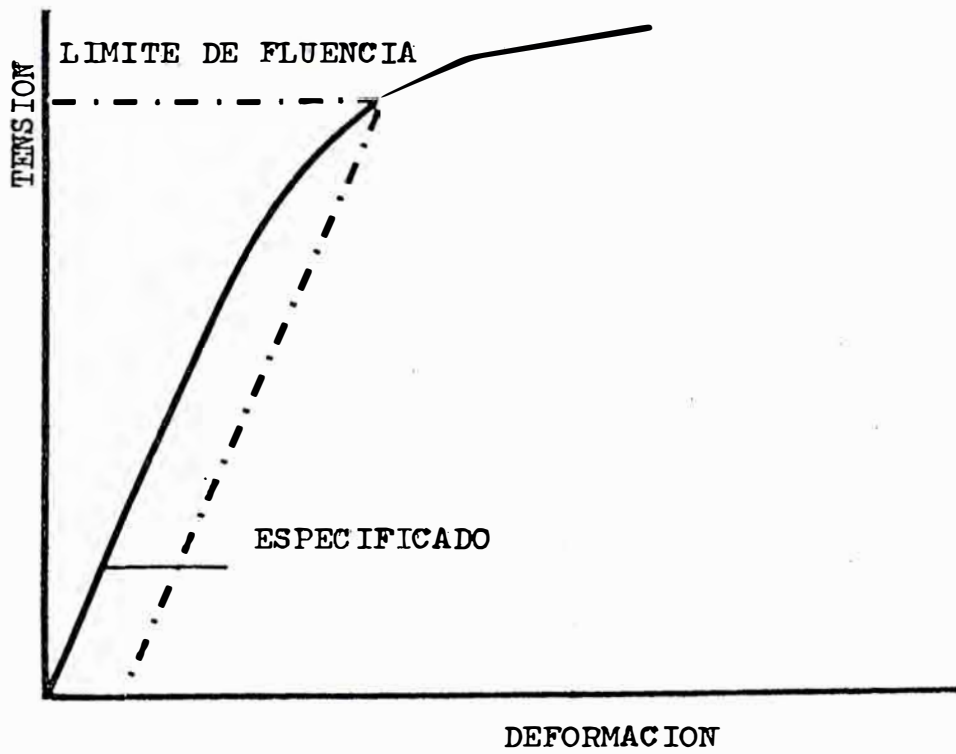


FIGURA 2.2.- Curva Tensión - Deformación, de una fundición nodular.

se puede aplicar la dureza Brinell. La dureza Rockwell "C" puede usarse para determinar la dureza de superficies que han sido templadas a la llama, sin embargo, los valores de dureza, usualmente indican de 6 a 8 Rockwell "C" menos que la dureza de la matriz real; debido al hecho de que las lecturas con el penetrador de punta de diamante, están influenciadas por los nódulos de grafito embebidos en la matriz.

e) RESISTENCIA A LA COMPRESION.- Es la máxima resistencia que puede resistir un metal sometido a compresión, sin una cantidad predefinida de deformación. La resistencia última o final, es la máxima resistencia que un material frágil puede resistir sin romperse, cuando está sometido a compresión.

f) RESISTENCIA AL CORTE.- Se ha definido como la intensidad de fuerza que actúa en el plano de un área. La resistencia al corte es igual a la fuerza de corte dividida entre el área de la sección transversal.

g) MODULO DE ELASTICIDAD.- Es la pendiente de la porción elástica de la curva tensión-deformación, en el ensayo de tracción. La tensión se divide por la unidad de elongación.

h) RESISTENCIA A LA TORSION.- Es la tensión de un material que resiste a la torsión.

i) MODULO DE RIGIDEZ.- En un ensayo de torsión, el módulo de rigidez es la relación de la tensión de corte unitaria, al desplazamiento causado por una unidad de longitud en el rango elástico. Este módulo corresponde al módulo de elasticidad en el ensayo de tracción.

j) COEFICIENTE DE POISSON.- Es la relación de la contracción de la sección transversal de una probeta de ensayo deformada a su elongación longitudinal, esencialmente es una afirmación de la constancia de volumen durante la deformación.

2.2.1. RESISTENCIA A LA TRACCION.- Muchas de las propiedades mecánicas de la fundición nodular están relacionadas directamente al valor en tensión del límite de fluencia convencional del 0.1% y es importante conocer con exactitud este valor, a fin de poder calcular las otras propiedades mecánicas. Las resistencias a la tracción se relacionan a los valores del límite de fluencia, presentando estas relaciones en las hojas de datos. Tales relaciones pueden usarse con confianza, para calcular el límite de fluencia de resistencias a la tracción conocidas en fundiciones nodulares completamente ferríticas, sin embargo, no debe considerarse, necesariamente, como muy confiable en fundiciones nodulares de alta resistencia. En tales fierros, la resistencia total a la tracción no siempre puede ser realizada y en estos casos la relación da un valor bajo inexacto del límite de fluencia. Luego, si otras propiedades mecánicas se basan en el límite de fluencia calculado, también resultarán con valores bajos. En consecuencia, es importante conocer el valor real del límite de fluencia del fierro que se está considerando, antes de aplicar las diversas fórmulas dadas en las hojas de datos generales.

En la fundición nodular, el límite de proporcionalidad (basado en el límite de fluencia convencional del 0.005%) es bajo en relación al valor del límite de fluencia convencional del 0.1%. La relación es alrededor de 0.75 para el grado 60-40-18 y 0.70 para el grado 65-45-12 de fundiciones nodulares ferríticas recocidas y de 0.6 en fundiciones nodulares perlíticas en bruto de colada. Se disponen de pocos datos para fierros con propiedades intermedias y también para fierros normalizados, templados y revenidos, sin embargo, parece apropiado usar una relación de 0.6 para estos fierros como para las fundiciones nodulares perlíticas en bruto de colada.

La relación del límite de fluencia del 0.1% a la resistencia a la tracción, es más alta en las fundiciones nodulares ferríticas que en las fundiciones nodulares perlíticas y se asume

que la relación decrece uniformemente a medida que incrementa la resistencia y la estructura cambia de ferrítica a perlítica en los grados intermedios de fundición nodular. La relación del límite de fluencia a la resistencia a la tracción, es mayor en los fierros templados y revenidos que en otras fundiciones nodulares.

Debido a que la curva tensión-deformación es más inclinada en el rango plástico en los fierros perlíticos que en los fierros ferríticos, el aumento de tensión requerido para aumentar la deformación plástica de 0.1 a 0.2% o de 0.1 a 0.5%, es mayor en la fundición nodular perlítica que en la fundición nodular ferrítica y esto se muestra en los valores de límite de fluencia presentados en las hojas de datos. Los incrementos de tensión para obtener límites de fluencia del 0.2% y 0.5% a partir de los valores del límite de fluencia del 0.1%, se asume para grados intermedios que varían uniformemente a medida que se aumenta la resistencia y la estructura cambia de ferrítica a perlítica. A un nivel de tensión de  $66.09 \text{ Kg/mm}^2$ , se encuentra que los incrementos de tensión son menores en las fundiciones nodulares templadas y revenidas que en las fundiciones nodulares perlíticas, sin embargo, ellos aumentan a medida que la resistencia a la tracción de las fundiciones nodulares templadas y revenidas, se incrementan.

a) PROPIEDADES DE TRACCION EN PROBETAS ENTALLADAS.- Los entalles aumentan la resistencia a la tracción de las fundiciones nodulares ferríticas recocidas, sin embargo, disminuyen la resistencia de las fundiciones nodulares perlíticas y, también se considera que bajan la resistencia de las fundiciones nodulares templadas y revenidas, aún cuando no se disponga de alguna evidencia directa. En las ferríticas, la profundidad del entalle, tanto como el perfil del entalle, es importante en la determinación del incremento en la resistencia obtenida, como se muestra en la información dada en la hoja de datos generales. En las fundiciones nodulares perlíticas y las templadas y revenidas, sin embargo, se considera que el decremento en la resistencia, está relacionado principalmente al perfil

del entalle y no depende mucho de la profundidad del entalle. Se asume que las fundiciones nodulares con resistencias intermedias tienen propiedades entre aquellas de las fundiciones nodulares ferríticas y perlíticas.

b) RESISTENCIA A LA TRACCION EN CALIENTE.- Las propiedades de resistencia a la tracción en caliente de las fundiciones nodulares de grados perlíticos y ferríticos, disminuyen lentamente a 426.7 °C. En este punto, la elongación aumenta muy rápidamente y la resistencia a la tracción disminuye a casi 14.06 Kg/mm<sup>2</sup> a 648.9 °C.

TABLA 2.3.- RESISTENCIA A LA TRACCION EN CALIENTE DE FUNDICIONES NODULARES FERRITICAS

Temperatura °C	Esfuerzo de Prueba del 0.1%, Kg/mm <sup>2</sup>	Resistencia a la tracción, Kg/mm <sup>2</sup>	Elongación %
21.1	35.15	50.27	12
482.2	16.03	29.88	29
510.0	13.53	26.01	30
537.8	11.18	22.64	26
565.6	9.49	19.16	31
593.3	7.24	16.52	33

c) PROBETAS DE ENSAYO PARA FUNDICION NODULAR.- Las siguientes figuras son los tipos de bloques fundidos para ensayos y las probetas de tracción maquinadas, usadas en el control de las propiedades mecánicas de las fundiciones nodulares. Los bloques de ensayo deben fundirse en moldes con arena de almas aglomeradas con aceite y completamente estufados. El molde del Bloque Y Modificado, se hace en 2 mitades y simultáneamente engrampados. La barra de ensayo puede cortarse fácilmente u obtenida al romper la sección de alimentación de la pieza. Esta barra de ensayo puede ser fácilmente maquinada en una probeta de ensayo de tracción o usarse como una probeta de ensayo de tracción sónico.

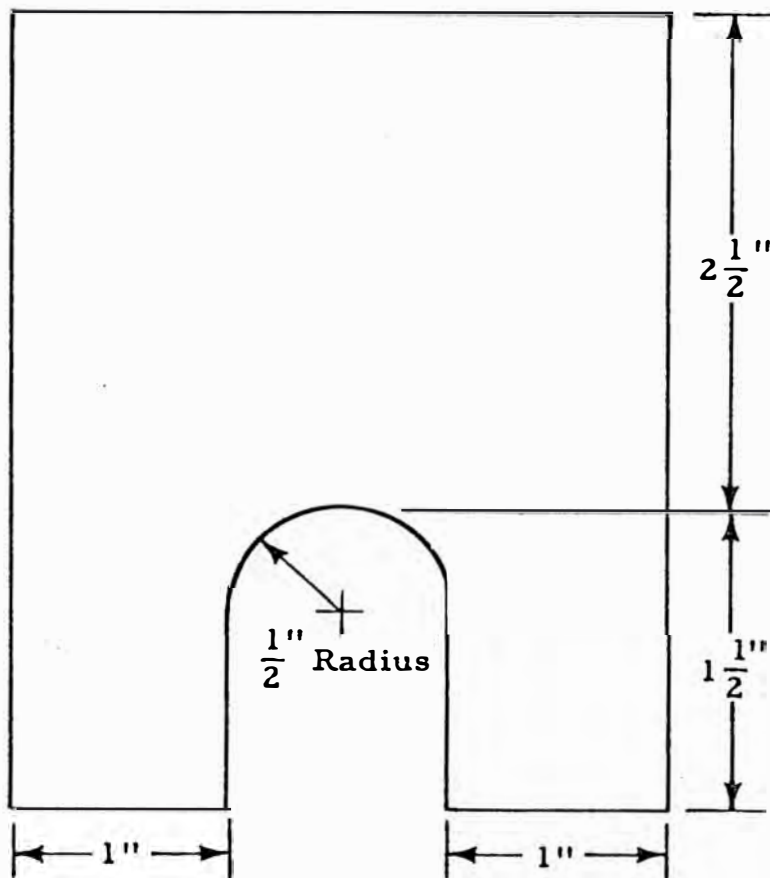


FIGURA 2.3.- Bloque para probetas de ensayo.  
Nota.- La longitud del bloque será de 6 pulgadas.

TAMAÑO DEL BLOQUE EN "Y"

Dimensión	1/2"	1"	3"
A	1/2	1	3
B	1 5/8	2 1/8	5
C	3/4	1 1/2	2 5/8
D	5 3/8	5 3/8	5 5/8
E	6	6	6

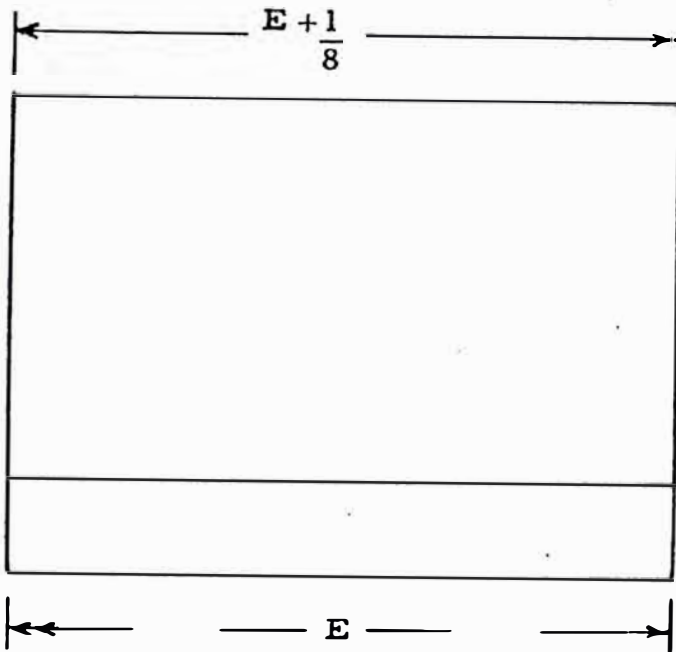


FIGURA 2.4 (a)

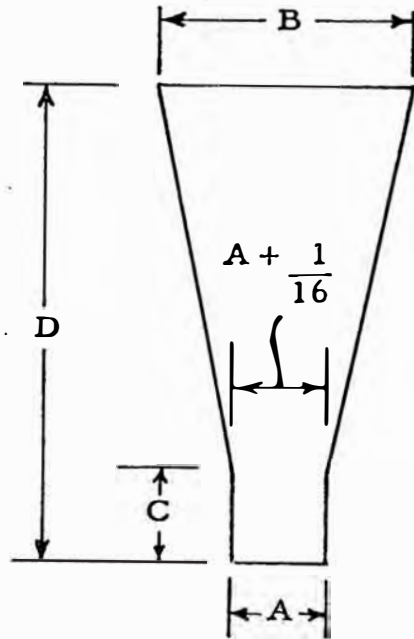


FIGURA 2.4 (b)

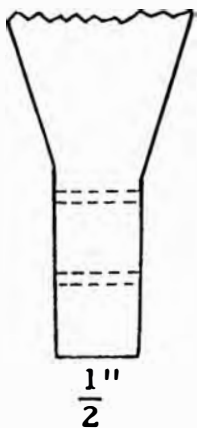


FIGURA 2.4 (c)

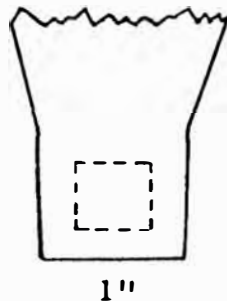


FIGURA 2.4 (d)

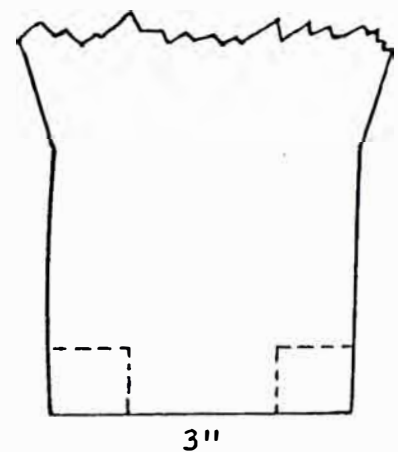


FIGURA 2.4 (e)

FIGURA 2.4.- Dimensiones del bloque en "Y" y la ubicación de las probetas de ensayo.



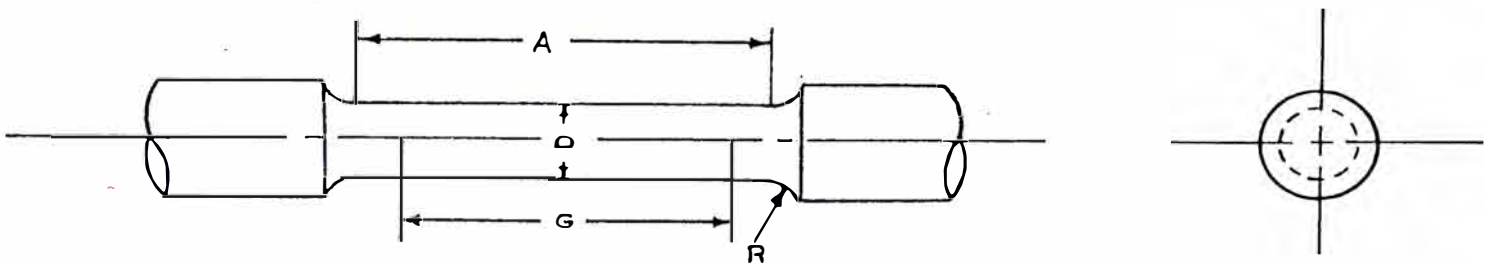


FIGURA 2.4 (f).- Probeta de tracción, maquinada.

Dimensiones	Probeta Standard, pulgadas (mm)	Probetas Pequeñas Proporcional al Standard, pulgadas (mm)	
	De 1/2" (13 mm)	De 0.350" (8.89 mm)	De 0.250" (6.35 mm)
Longitud G de medida	2.000 + 0.005 (50.8 ± 0.13)	1.400 + 0.005 (35.6 ± 0.13)	1.000 + 0.005 (25.4 ± 0.13)
Diámetro D (Nota 1)	0.500 + 0.010 (12.7 ± 0.25)	0.350 + 0.007 (8.89 ± 0.18)	0.250 + 0.005 (6.35 ± 0.13)
Radio R del filete	3/8 mín. (9.5 mín.)	3/8 mín. (9.5 mín.)	1/4 mín. (6.35 mín.)
Longitud A (Nota 2)	2 1/4 mín. (57.2 mín.)	1 3/4 mín. (44.5 mín.)	1 1/4 mín. (31.8 mín.)

Nota 1.- La sección reducida puede tener un gradual ahusamiento hacia el centro partiendo del extremo, el diámetro del extremo no debe ser mayor de 0.005" más el diámetro del centro de la probeta standard, y no más de 0.003" mayor que el diámetro del centro de las probetas pequeñas.

Nota 2.- Si se desea, en las probetas pequeñas, la longitud A de la sección reducida puede incrementarse para acomodarse al extensómetro. Sin embargo, las marcas de referencia para medir la elongación nunca deben ser modificadas del valor indicado por la longitud G.

2.2.2. RESISTENCIA A LA COMPRESION.- Los defectos en compresión se producen a muy altas deformaciones, y la resistencia a la compresión en las fundiciones nodulares es de poco uso en el diseño. Solamente, el límite de

proporcionalidad y el límite de fluencia, por lo tanto, son los valores que se citan. El límite de proporcionalidad es siempre mayor en compresión que en tracción y parece ser aproximadamente a  $0.8 \times$  límite de fluencia del  $0.1\%$ , en compresión, para fundicio- nes nodulares perlíticas y ferríticas. Se asume que una relación similar es aplicada para fundiciones nodulares con resistencias intermedias y también en fundiciones nodulares templadas y reveni- das. El valor del límite de fluencia del  $0.1\%$ , es también un poco mayor en compresión que en tracción, debido a que el comienzo de la deformación plástica se retarda ligeramente bajo carga de com- presión.

El límite de fluencia del  $0.1\%$ , en compresión, excede al de tracción en una gran cantidad en las fundiciones nodulares ferríticas más que en las perlíticas. La diferencia entre los va- lores correspondientes del límite de fluencia del  $0.5\%$ , es peque- ña, sin embargo, es ligeramente mayor en las fundiciones nodula- res perlíticas. La diferencia entre los valores del límite de fluencia en tracción y compresión, se considera que cambia unifor- memente a medida que la resistencia de las fundiciones nodulares de grados intermedios incrementa con el cambio estructural de fe- rrítica a perlítica. Los valores para las fundiciones nodulares templadas y revenidas, se asumen que son similares a aquellos de las fundiciones nodulares perlíticas.

2.2.3. RESISTENCIA AL CORTE.- Se disponen de pocos datos de resis- tencia al corte de las fundiciones nodulares. Esto se debe principalmente a que es muy difícil obte- ner valores exactos de resistencia al corte, en materiales que presentan cierta ductilidad, en vista de que en un doble ensayo al corte, por ejemplo, es muy difícil evitar la flexión. Sin em- bargo, se considera que la resistencia al corte de la fundición nodular es alrededor de  $0.9 \times$  resistencia a la tracción. Esta re- lación se basa en anteriores ensayos llevados a cabo sobre fundi- ciones nodulares tratadas con cerio y también de resultados obte- nidos en fundiciones maleables.

2.2.4. RESISTENCIA A LA TORSION.- Todas las fundiciones nodulares se deforman considerablemente bajo esfuerzos de torsión al corte y no siempre es posible continuar un ensayo de torsión, por fallas. Sin embargo, basado principalmente sobre los resultados obtenidos en fundiciones nodulares perlíticas, se considera que la resistencia a la torsión es alrededor de 0.9 x resistencia a la tracción. Se ha usado esta relación para calcular los valores dados en la hoja de datos.

Los valores del límite de proporcionalidad y límite de fluencia son más confiables y, desde luego, de mucho más valor para el diseño. El valor del límite de proporcionalidad, en torsión, es aproximadamente 0.75 x límite de fluencia del 0.1%, en torsión, para todas las fundiciones nodulares y el valor del límite de fluencia del 0.1%, en torsión, varía entre 0.775 y 0.7 x límite de fluencia del 0.1%, en tracción, para las fundiciones nodulares ferríticas y perlíticas, respectivamente; valores intermedios de esta relación, se obtienen en fundiciones nodulares con estructuras combinadas. En las fundiciones nodulares, se asume que tienen valores similares a aquellos de las fundiciones nodulares perlíticas. Los valores del límite de fluencia del 0.2% y 0.5%, en torsión, pueden obtenerse de los valores correspondientes del límite de fluencia, en tracción, multiplicados por la misma relación que se usó para los valores del 0.1%.

2.2.5. MODULO DE ELASTICIDAD.- El módulo de elasticidad de las fundiciones nodulares perlíticas es aproximadamente  $703 \text{ Kg/mm}^2$  mayor que el de las fundiciones nodulares recocidas y se considera que es alrededor de  $352 \text{ Kg/mm}^2$  mayor que el de las fundiciones nodulares templadas y revenidas. Normalmente, un valor de  $17,929 \text{ Kg/mm}^2$  es apropiado para una fundición nodular perlítica, dando valores de  $17,577$  y  $17,225 \text{ Kg/mm}^2$  para fundiciones nodulares templadas y revenidas y fundiciones nodulares recocidas, respectivamente. Estos valores son presentados en la hoja de datos generales.

2.2.6. MODULO DE RIGIDEZ.- Las fundiciones nodulares tienen un valor de la relación de Poisson de aproximadamente 0.275 y el módulo de rigidez se relaciona al módulo de elasticidad según la expresión siguiente:

$$E = 2 G (1 + \nu)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad

G = Módulo de rigidez

$\nu$  = Relación de Poisson

Por lo tanto, el módulo de rigidez es aproximadamente 0.39 x módulo de elasticidad. Esto se ha confirmado con ensayos mecánicos y se usó esta relación para calcular los valores dados en la hoja de datos.

2.2.7. RELACION DE POISSON.- Este valor presenta poca variación en las fundiciones nodulares y puede tomarse como 0.275.

2.2.8. LIMITE DE FATIGA.- (Usando equipo Wohler de flexión rotativa con probetas de 10.59 mm (0.417") de diámetro). En las fundiciones nodulares recocidas ferríticas, el límite de fatiga es alrededor de 0.5 x resistencia a la tracción, en fundiciones nodulares con resistencia a la tracción de hasta 40.78 Kg/mm<sup>2</sup>. La relación decrece aproximadamente 0.01 por cada 1.40 Kg/mm<sup>2</sup>, incrementándose con resistencias a la tracción superiores a 40.78 Kg/mm<sup>2</sup>. En las fundiciones nodulares perlíticas y en las templadas y revenidas, el límite de fatiga es aproximadamente 0.4 x resistencia a la tracción y la relación disminuye alrededor de 0.004 por cada 1.40 Kg/mm<sup>2</sup>, incrementándose con resistencias a la tracción por encima de 75.23 Kg/mm<sup>2</sup>. En fundiciones nodulares con resistencias intermedias, es apropiada una relación de aproximadamente 0.45, para una fundición nodular con una resistencia de 49.92 Kg/mm<sup>2</sup> y disminuye alrededor de 0.005 por cada 1.40 Kg/mm<sup>2</sup>, incrementándose con resistencias superiores a 49.92

Kg/mm<sup>2</sup>.

Con una probeta de 10.59 mm de diámetro, un entalle circunferencial en V de 45°, con un radio en la base de 0.25 mm, disminuye el límite de fatiga de las fundiciones nodulares recocidas a un valor de aproximadamente 0.63 x límite de fatiga en fundiciones nodulares sin entalle, con resistencias a la tracción de hasta 40.78 Kg/mm<sup>2</sup>. Esta relación disminuye alrededor de 0.007 por cada 1.40 Kg/mm<sup>2</sup>, incrementándose con resistencias a la tracción superiores a 40.78 Kg/mm<sup>2</sup>. En fundiciones nodulares con resistencias intermedias y en las perlíticas, además en las templadas y revenidas, el límite de fatiga, con entalle, es aproximadamente 0.6 x límite de fatiga en fundiciones nodulares sin entalle.

2.2.9. DUREZA.- La dureza Brinell de las fundiciones nodulares parece estar relacionada estrechamente al valor del límite de fluencia del 0.1%. Si el límite de fluencia del 0.1% se mide en 1.40 Kg/mm<sup>2</sup>, entonces la dureza Brinell será de 7.8 a 8.5 x límite de fluencia del 0.1%, en tracción, para fundiciones nodulares recocidas. Para una fundición nodular con una resistencia intermedia de 49.92 Kg/mm<sup>2</sup>, la relación será de 7.8 a 8.5, y los valores máximo y mínimo de esta relación pueden incrementarse progresivamente con el aumento en la resistencia a la tracción hasta valores de 9.6 a 11.0, alcanzados en una fundición nodular con una resistencia a la tracción de 66.09 Kg/mm<sup>2</sup>. En las fundiciones nodulares perlíticas la relación será de 9.6 a 11.0, en una fundición nodular con un valor del límite de fluencia del 0.1%, de 35.86 Kg/mm<sup>2</sup>, y la relación decrecerá aproximadamente 0.15 por cada 1.40 Kg/mm<sup>2</sup>, aumentando con límites de fluencia del 0.1%, mayores de 35.86 Kg/mm<sup>2</sup>. En fundiciones nodulares templadas y revenidas la relación será de 6.6 a 7.3 para una fundición nodular con un límite de fluencia del 0.1%, de 49.92 Kg/mm<sup>2</sup>, y esta relación decrecerá alrededor de 0.029 por cada 1.40 Kg/mm<sup>2</sup>, incrementándose con límites de fluencia del 0.1%, mayores a 49.92 Kg/mm<sup>2</sup>. Se citan estos valores en la hoja de datos generales.

2.2.10.- PROPIEDADES DE IMPACTO.- Los datos de impacto presentados, son de probetas Charpy con y sin entalle. Las fundiciones nodulares ferríticas con resistencias a la tracción por debajo de 42.18 Kg/mm<sup>2</sup>, son especificadas con entalle normalmente, cuando se requieran muy altas ductilidades, y tales fundiciones nodulares tienen temperaturas de transición dúctil a frágil, en pruebas de impacto con entalle, la cual empieza a temperaturas de -10 °C a 30 °C. Si la temperatura de transición se basa sobre el valor promedio en el rango de transición (siendo la fractura aproximadamente 50% dúctil), está por debajo de 21 °C. En un ensayo de impacto sin entalle, las correspondientes temperaturas de transición son aproximadamente 66.7 °C menor que en el ensayo con entalle. En el rango dúctil, se obtienen valores de impacto con entalle de 1.66 - 1.94 m-Kg e invariablemente los valores a temperatura ambiente son de 1.38 m-Kg o más. Similares propiedades de impacto, frecuentemente se obtienen en fundiciones nodulares recocidas ferríticas con resistencias a la tracción superiores a 42.18 Kg/mm<sup>2</sup>, sin embargo para obtenerlas pueden requerirse cuidados especiales en su producción.

Las fundiciones nodulares con resistencias a la tracción de 49.92 Kg/mm<sup>2</sup> o más, conteniendo cantidades considerables de ferrita, aún tienen buena ductilidad y tenacidad, sin embargo las propiedades de impacto disminuyen a medida que la fundición nodular se hace más perlítica, y a un nivel de resistencia a la tracción de 58.36 Kg/mm<sup>2</sup> algo de ductilidad y tenacidad se sacrifica, con el objeto de utilizar las propiedades de gran resistencia. Los grados perlíticos de fundición nodular se usan principalmente, debido a que las aplicaciones de alta resistencia requieren solamente una limitada ductilidad y tenacidad, comparadas con los grados ferríticos de fundición nodular.

Las fundiciones nodulares templadas y revenidas tienen temperaturas de transición en el impacto, mucho menores que las fundiciones nodulares perlíticas de resistencia similar y pueden producirse con temperaturas de transición tan bajas como aquellas obtenidas en las correspondientes fundiciones nodulares recocidas ferríticas. Los valores de impacto en el rango dúctil son, sin embargo, menores que en las fundiciones nodulares ferríticas. Son típicos los valores de impacto con entalle, en el rango dúctil, de aproximadamente 0.69 m-Kg y valores de impacto sin entalle de 3.46 - 5.53 m-Kg. Como explicamos previamente, tales fundiciones nodulares deben considerarse con especial

cuidado, ya que estas no se producen en el curso normal de producción. Información más detallada sobre propiedades de impacto, se incluyen en la hoja de datos.

El Si y P disminuyen marcadamente la tenacidad al impacto a concentraciones normales y deben mantenerse lo más bajo posible en las fundiciones nodulares ferríticas en bruto de colada y fundiciones nodulares recocidas ferríticas, para aplicaciones que impliquen cargas de choque. La pérdida de tenacidad al impacto de una fractura dúctil a frágil, ocurre dentro del rango de la temperatura de transición. Para aplicaciones de cargas de choque a temperaturas de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  o menos, el Si debe ser menor de 2.50% y preferentemente en el rango de 1.75% a 2.00% para grados recocidos. Todos los elementos comunes, Mn, P, Ni, etc. aumentan la temperatura de transición. En las fundiciones nodulares ferríticas típicas con un contenido de Si en el rango de 2.70%, la temperatura de transición donde la resistencia al impacto cae de la meseta superior, es aproximadamente  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$  para las fundiciones nodulares ferríticas, y es sustancialmente mayor en las fundiciones nodulares perlíticas y aciculares.

Los grados austeníticos o Ni-Resist, no tienen las temperaturas de transición abruptas de los grados de baja aleación. Las propiedades de impacto de los tipos que contienen Cr, declinan lentamente de  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en tanto que los grados D-2C y D-5 pierden sus propiedades de impacto más rápidamente, sin embargo, igual a aquellos de los otros tipos a  $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 2.3. PROPIEDADES MAGNETICAS

Las propiedades magnéticas de las fundiciones nodulares producidas comercialmente, son determinadas por la estructura de la matriz. Las fundiciones nodulares ferríticas son magnéticamente blandas y se usan sobre todo cuando se requieren buenas propiedades magnéticas. Las perlíticas son magnéticamente duras y tienen una alta pérdida magnética. Las permeabilidades magnéticas más altas se obtienen en las fundiciones nodulares libres de Ni con contenidos de Si muy altos, mayores que aquellos usados normalmente en el comercio.

Las permeabilidades magnéticas dadas en la hoja de datos, son para fundiciones nodulares normales disponibles comercialmente, con contenidos de Ni entre 0.5 y 1%, y contenidos de Si entre 2 y 2.5%. Los datos se dan para

fundiciones nodulares totalmente ferríticas y totalmente perlíticas. Para fundiciones nodulares con estructuras y propiedades intermedias, se ha asumido que el cambio en propiedades será uniforme a medida que la estructura cambia de perlítica a ferrítica. Los datos sugieren que las fundiciones nodulares con estructuras templadas y revenidas, tendrán una menor permeabilidad y mayor magnetismo remanente, fuerza coerciva y pérdida por histéresis, que las fundiciones nodulares de grados perlíticos con similares resistencia a la tracción. No pueden darse cálculos detallados para fundiciones nodulares templadas y revenidas.

#### 2.4. PROPIEDADES ELECTRICAS

Las fundiciones de grafito nodular tienen menores resistividades eléctricas que las fundiciones de grafito laminar y los elementos principales que afectan sus resistividades son Si y Ni, los cuales aumentan la resistividad. La resistividad eléctrica de las fundiciones nodulares perlíticas normalmente disponibles con 0.5 - 1.0 %Ni y 2.0 - 2.5 %Si, es aproximadamente  $54 \times 10^{-6}$  ohm-cm. Las resistividades son menores en las ferríticas y puede esperarse que tengan un valor de resistividad eléctrica de  $50 \times 10^{-6}$  ohm-cm. Estos valores se han asumido en la hoja de datos y a las fundiciones con estructuras intermedias se le han dado valores intermedios.

#### 2.5. PROPIEDADES DIVERSAS

Presentamos a continuación una serie de propiedades de las fundiciones nodulares, que también son de suma importancia.

a) COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA.- La información disponible indica que las fundiciones nodulares tienen un coeficiente de expansión térmica similar a aquellos de las fundiciones grises y se citan valores típicos, principalmente sobre los resultados de la fundición gris.

b) CONDUCTIVIDAD TERMICA.- Las fundiciones nodulares ferríticas tienen una mayor conductividad térmica que las perlíticas y se asume que las fundiciones nodulares templadas y revenidas tienen valores comprendidos entre aquellos de las ferríticas y perlíticas. Resistencias intermedias incrementan la conductividad debido a la eliminación de la ferrita. En la hoja de datos generales se dan los valores típicos.



c) ESTABILIDAD TERMICA.- La perlita en las fundiciones nodulares es estable a aproximadamente 427 °C. En este punto, la perlita comienza lentamente a esferoidizarse. A la temperatura de transformación térmica (aproximadamente 749 °C), la perlita se transforma en ferrita y grafito. A temperaturas superiores a la temperatura de transformación, la estructura consiste de austenita y grafito. Cuando las temperaturas de servicio de la pieza están en el rango de 482 °C a 704 °C, las dimensiones de la pieza se estabilizan por recocidos a 811 °C - 899 °C y posterior enfriamiento a 538 °C o debajo de esta temperatura.

Para obtener una máxima estabilidad dimensional los grados austeníticos son sometidos a un alivio de tensiones a 649 °C - 677 °C.

d) GRAVEDAD ESPECIFICA.- La gravedad específica de una fundición nodular recocida es ligeramente menor que la de la perlítica y se asume que las fundiciones nodulares templadas y revenidas tienen valores comprendidos entre aquellos de las perlíticas y ferríticas. En fundiciones nodulares con resistencias intermedias, el valor tiende a aumentar a medida que la resistencia incrementa, como se muestra en la hoja de datos generales.

e) CRECIMIENTO.- Las fundiciones nodulares son varias veces más resistentes al crecimiento que las fundiciones grises. Las fundiciones nodulares ferríticas presentan muy poco crecimiento por debajo de 816 °C, mientras que las perlíticas comienzan a crecer por encima de 427 °C y aumentan significativamente por encima de 649 °C por grafitización (aproximadamente 0.5%). Ambos tipos, particularmente los grados perlíticos, presentan crecimiento por encima de 816 °C (0.5 a 1.0%). Reciclando a través de la temperatura de transformación, puede aumentarse el crecimiento tanto como 3.0%.

Como en el caso de la fundición nodular, el calentamiento también origina la descomposición del C combinado, sin embargo, la forma esferoidal del grafito proporciona una menor área superficial disponible para la oxidación que ocurre con una consecuente velocidad de crecimiento reducida.

Cálculos comparativos del crecimiento en fundiciones laminares y nodulares, expuestos a 899 °C por 24 horas:

Fundición gris no aleada:	0.073 pulg/pulg
Fundición gris aleada	0.077 pulg/pulg

Fundición nodular en bruto de colada; 0.0049 pulg/pulg

Fundición nodular recocida : 0.0024 pulg/pulg

f) CHOQUE TERMICO.- Se ha encontrado que, cuando todos los tipos de fierro fundido fueron ensayados con calentamientos alternados a 816 °C y templados en agua, la fundición nodular fue la más resistente a las rajaduras. La fundición nodular ferrítica fue la más resistente al choque térmico que la fundición nodular perlítica.

g) RESISTENCIA A LA FLUENCIA SERPEANTE.- En general los grados perlíticos son un tanto superiores por debajo de 482 °C. Sin embargo, el grado ferrítico es superior por encima de 482 °C.

h) TEMPERATURA DE FUSION (LIQUIDUS).- Las fundiciones nodulares perlíticas y ferríticas tienen una temperatura de liquidus de 1,121 °C a 1,177 °C, dependiendo de su composición. Las austeníticas o Ni-Resist, tienen las siguientes temperaturas de liquidus:

<u>Tipo de fundición nodular</u>	<u>Temperatura de liquidus</u>
D-2	1,232 °C
D-2B	1,260 °C
D-2C	1,232 °C
D-3	1,232 °C
D-4	1,204 °C

i) COMPOSICION QUIMICA.- En la actualidad el objetivo principal de todas las especificaciones referidas con la fundición nodular usada para producir piezas para la ingeniería en general y fines estructurales, es definir los requerimientos de propiedades mecánicas. Sin embargo, la composición química debe ser considerada por los productores de piezas a fin de controlar las propiedades mecánicas. La Tabla 2.2 presenta las relaciones generales entre la composición química y las propiedades mecánicas de las fundiciones nodulares no aleadas y de baja aleación, en las condiciones de bruto de colada y tratadas térmicamente. La información presentada aquí puede usarse como una guía para ajustar la composición en la producción de la fundición nodular.

j) STANDARD RADIOGRAFICO.- Debido a que no hay standares radiográficos para la

fundición nodular, los estándares para piezas fundidas de acero Norma A.S.T.M. E-71-64, en ocasiones se han adoptado en piezas específicas de fundición nodular. Sin embargo, el uso irrestricto de esta norma para la fundición nodular, no es recomendable.

## 2.6. ESFUERZOS DE DISEÑO

a) TENSION.- En muchas aplicaciones puede parecer apropiado seleccionar un esfuerzo de diseño por debajo del límite de proporcionalidad. Como una regla general, un máximo esfuerzo de diseño de  $0.75 \times$  límite de proporcionalidad es aproximadamente  $0.75 \times$  límite de fluencia del 0.1%, en fundiciones nodulares recocidas ferríticas, grados 60-40-18 y 65-45-12 respectivamente, y 0.60 en otros grados de fundición nodular. Esto limita el esfuerzo de diseño de 0.56 a  $0.52 \times$  el valor del límite de fluencia del 0.1%, en fundiciones nodulares recocidas ferríticas y  $0.45 \times$  el valor del límite de fluencia del 0.1%, en otras fundiciones nodulares.

b) COMPRESION.- Nuevamente, un valor de  $0.75 \times$  límite de proporcionalidad, se sugiere como el máximo esfuerzo de diseño en compresión. En vista de que en compresión el límite de proporcionalidad es aproximadamente  $0.8 \times$  el valor del límite de fluencia del 0.1%, en la fundición nodular, un valor de  $0.6 \times$  el límite de fluencia del 0.1% en compresión, se usa en la hoja de datos.

c) FATIGA.- Se sugiere que el esfuerzo de diseño en fatiga debe ser  $1/3$  del límite de fatiga citado, para dar un factor adecuado de seguridad y tolerar cualquier diferencia en el límite de fatiga entre la pieza y las pequeñas barras de ensayo con las que se obtienen los datos de fatiga.

## 2.7. CARACTERISTICAS Y APLICACIONES

Los diferentes tipos de fundición nodular tienen las siguientes características:

### a) TIPO 60-40-18 (Recocido)

- Características.- Es generalmente recocido aún cuando puede producirse en la condición de bruto de colada. La estructura es completamente ferrítica. Puede usarse para reemplazar a la fundición maleable ferrítica y a los aceros de bajo carbono.

Aplicaciones.- Aplicaciones marinas, válvulas, conexiones, empleado en implementos agrícolas y camiones, articulaciones en la dirección de los automóviles y donde se requieran propiedades de impacto y ductilidad.

b) TIPO 65-45-12 (En bruto de colada y recocido)

- Características.- Máxima tenacidad y maquinabilidad. Fácilmente soldable. Estructura esencialmente ferrítica. No endurecible fácilmente por flameado o inducción como los siguientes 3 tipos. Puede sustituir al acero o a la fundición maleable.
- Aplicaciones.- Piezas que trabajan a presión, cuerpo de válvulas, cuerpo de compresoras, lingoteras, conexiones de tuberías, válvulas, cilindros, cuerpo de bombas, barras de conexión, autopartes resistentes al choque, uso agrícola y eléctrico, máquinas, uso marino y en aplicaciones que requieran máxima tenacidad a alta temperatura. Además, en aplicaciones que impliquen severos choques térmicos y mecánicos.

c) TIPO 80-55-06 (En bruto de colada)

- Características.- Esencialmente es una estructura perlítica con buena maquinabilidad y tenacidad. Responde fácilmente al endurecimiento por flameado o inducción. Puede vaciarse contra un enfriador o chill para producir una superficie carbúrica, resistente a la abrasión. Son soldables y pueden soportar severos esfuerzos.
- Aplicaciones.- Engranajes, levas, matrices, pistones, cigueñales, poleas, cadenas, autopartes que requieran gran resistencia y resistencia al desgaste, aplicaciones en motores diesel, aeronáutica, agricultura, minería, maquinaria pesada, industria textil, industria del papel y otras.

d) TIPO 100-70-03

- Características.- Este grado, usualmente, es normalizado y revenido, aún cuando puede alearse para producir estas propiedades sin el tratamiento térmico. La estructura es perlítica. Ofrece una excelente combinación de resistencia, tenacidad y resistencia al desgaste. Fácilmente endurecible por flameado o inducción.
- Aplicaciones.- Engranajes, cigueñales, eje de levas, matrices, pistones, implementos agrícolas tales como cabezales, trinquetes y o

tros, regulador de pesos, zapatas de camión, tambores de freno para tractores. Maquinaria minera.

e) TIPO 120-90-02

- Características.- Usualmente, este grado es templado en aceite y revenido, aún cuando secciones de hasta 1.5" de espesor pueden normalizarse y revenirse. Se deben usarse elementos aleantes tales como el Ni y Mo para obtener la adecuada templabilidad en secciones gruesas. Fácilmente endurecibles por flameado o inducción, alcanzando 58 Rockwell C (618 BHN).

Aplicaciones.- Piñones, engranajes, cigueñales, levas, matrices, guías de máquinas, poleas de tensión, prensas de taladro de columna, revestimientos de bombas, tambores de acoplamiento.

f) TIPO RESISTENTE AL CALOR (2.8 a 6.0 %Si)

- Características.- Máxima resistencia a la oxidación y al crecimiento. Las secciones menores de 1" de espesor, usualmente, son recocidas para obtener una máxima estabilidad dimensional. Altos contenidos de Si incrementan la dureza y resistencia, sin embargo, reducen la ductilidad y tenacidad a temperatura ambiente, aún cuando a elevadas temperaturas se alcanzan tenacidades normales. Este grado no se recomienda en aplicaciones que impliquen severos choques térmicos.

- Aplicaciones.- Puertas y bastidores de hornos, barras de parrillas, partes de alto horno, crisoles para sinter, crisoles para reducción, molde de vidrios, émbolos, crisoles de recocido, canales para escoria, paletas, etc.

## 2.8. MICROESTRUCTURAS

Las estructuras determinan el grado, tipo, aplicación, propiedades, etc. A continuación presentamos las estructuras típicas de las fundiciones nodulares.

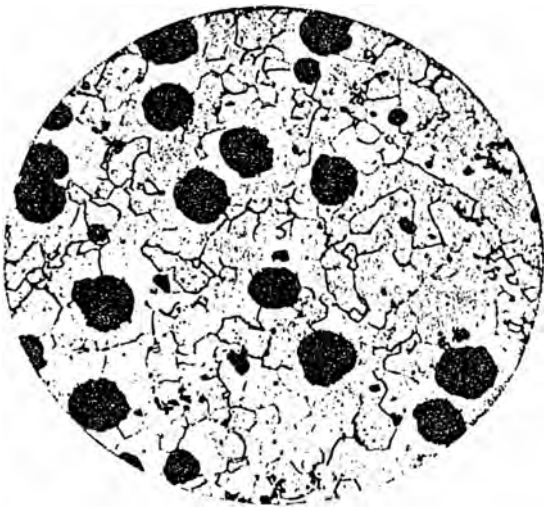


FIGURA 2.5.- Fundición nodular recocida, completamente ferrítica, atacada con Nital al 2%, a 250 X.

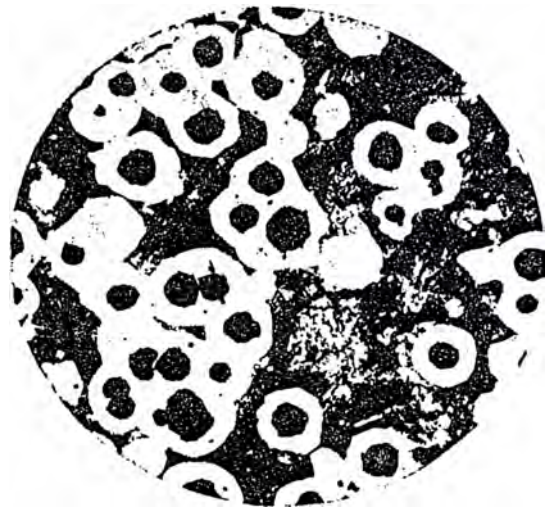


FIGURA 2.6.- Fundición nodular en bruto de colada, 50% ferrita y 50% perlita, atacada con Nital al 2%, a 100 X.

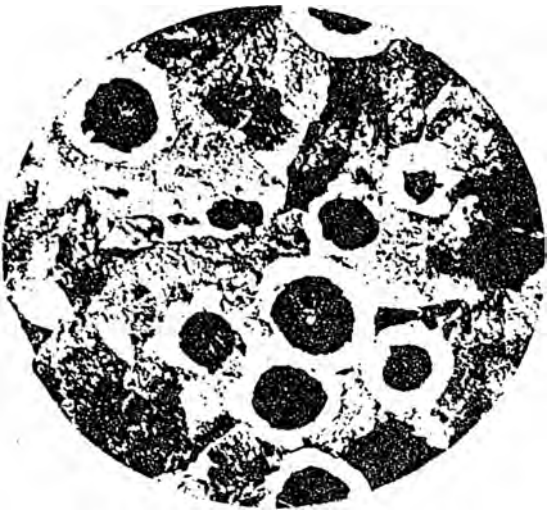


FIGURA 2.7.- Fundición nodular de matriz perlítica, 75% perlita y 25% ferrita, atacada con Nital al 2%, a 250 X.

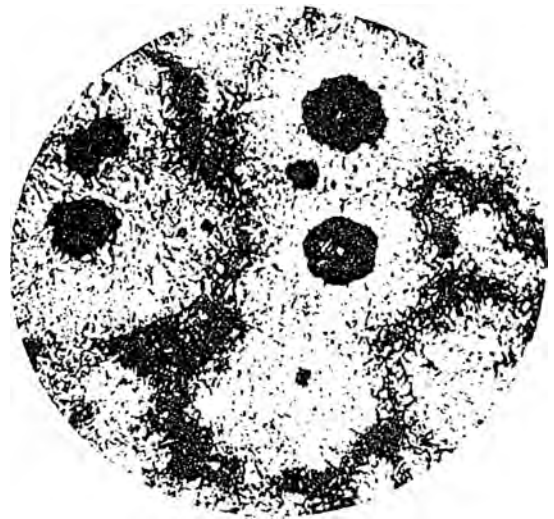


FIGURA 2.8.- Fundición nodular de matriz acicular, atacada con Nital al 2%, a 250 X.

C A P I T U L O    I I I   .- METALURGIA DE LA FUNDICION NODULAR

### 3.1. DIAGRAMA DE EQUILIBRIO Fe-C Y Fe-C-Si

El tratamiento con Mg no cambia significativamente las características de solidificación del hierro fundido, solamente altera la forma del grafito a la forma esferoidal. Sin embargo, los fierros fundidos tratados con Mg tienden hacia un grado de sobreenfriamiento por debajo de la temperatura de equilibrio del solidus, de las formas no tratadas de análisis similar. Esto se debe principalmente al alto grado de nucleación presente en la fundición nodular, producido por el Mg y la post-inoculación.

Las transformaciones o cambios de fase que ocurren en aleaciones Fe-C y Fe-C-Si, tales como la fundición gris y la fundición nodular, se ilustran en las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3. La temperatura de solidificación, relaciones de fases y estructuras de los fierros fundidos comerciales, varían de aquellos mostrados en los diagramas siguientes.

A menudo, los fierros fundidos han sido descritos como una aleación de Fe y C, en el que el Si promueve la formación de grafito. Usualmente, la relación temperatura y fase estructural, se describe por medio del diagrama binario Fe-C, sin ninguna explicación del cambio de fase introducido por el tercer elemento Si. Hay un número de puntos a considerarse en la estructura del hierro fundido que no puede explicarse satisfactoriamente con el diagrama usual Fe-C. Por estas razones y por el hecho que actualmente se ha puesto mucho énfasis en el uso de los datos del carbono equivalente para el control de la fusión, los fierros fundidos son considerados como aleaciones de 3 componentes o ternarias consistentes de Fe, C y Si.

Un diagrama de fase ternario o de 3 componentes, tal como el diagrama Fe-C-Si toma la forma de un modelo espacial de 3 dimensiones, antes que el modelo plano o de 2 dimensiones del diagrama Fe-C. A fin de hacer posible un claro entendimiento del diagrama ternario, este evolucionará a través de las Figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4, comenzando con un diagrama binario simple Fe-C.

La Figura 3.1 es el diagrama Fe-C, que presenta los cambios de fase en las aleaciones Fe-C y sus relaciones de composición y temperatura. Las Figuras 3.2 y 3.3 son proyecciones del diagrama de 2 dimensiones Fe-C que representan adiciones de 2 %Si y 4 %Si a una aleación Fe-C. La Figura 3.4 es una sección del diagrama tri-dimensional Fe-C-Si, mostrando las posiciones relativas



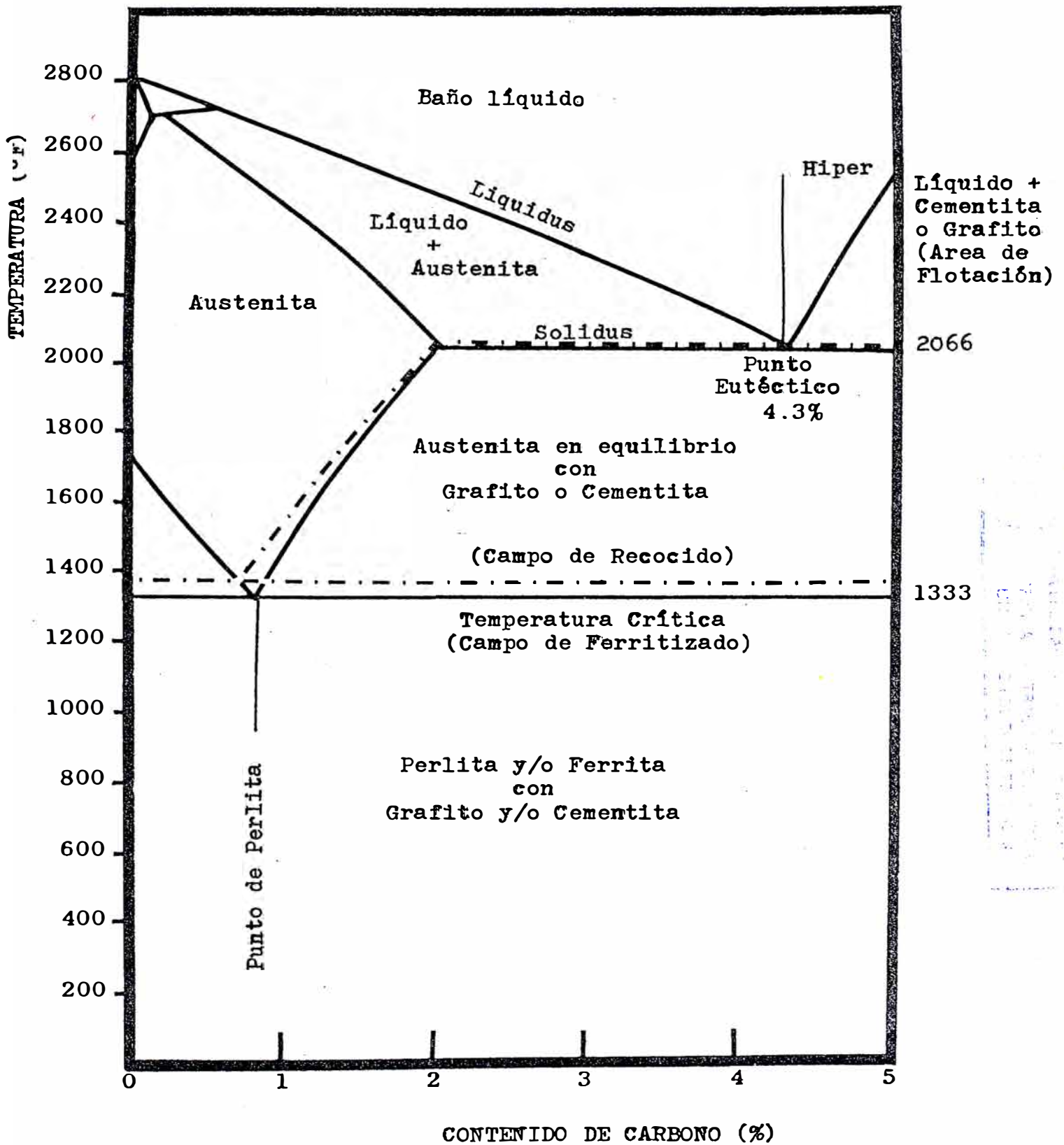


FIGURA 3.1.- Diagrama de equilibrio simplificado Fierro-Carbono, con 0.0% Si.

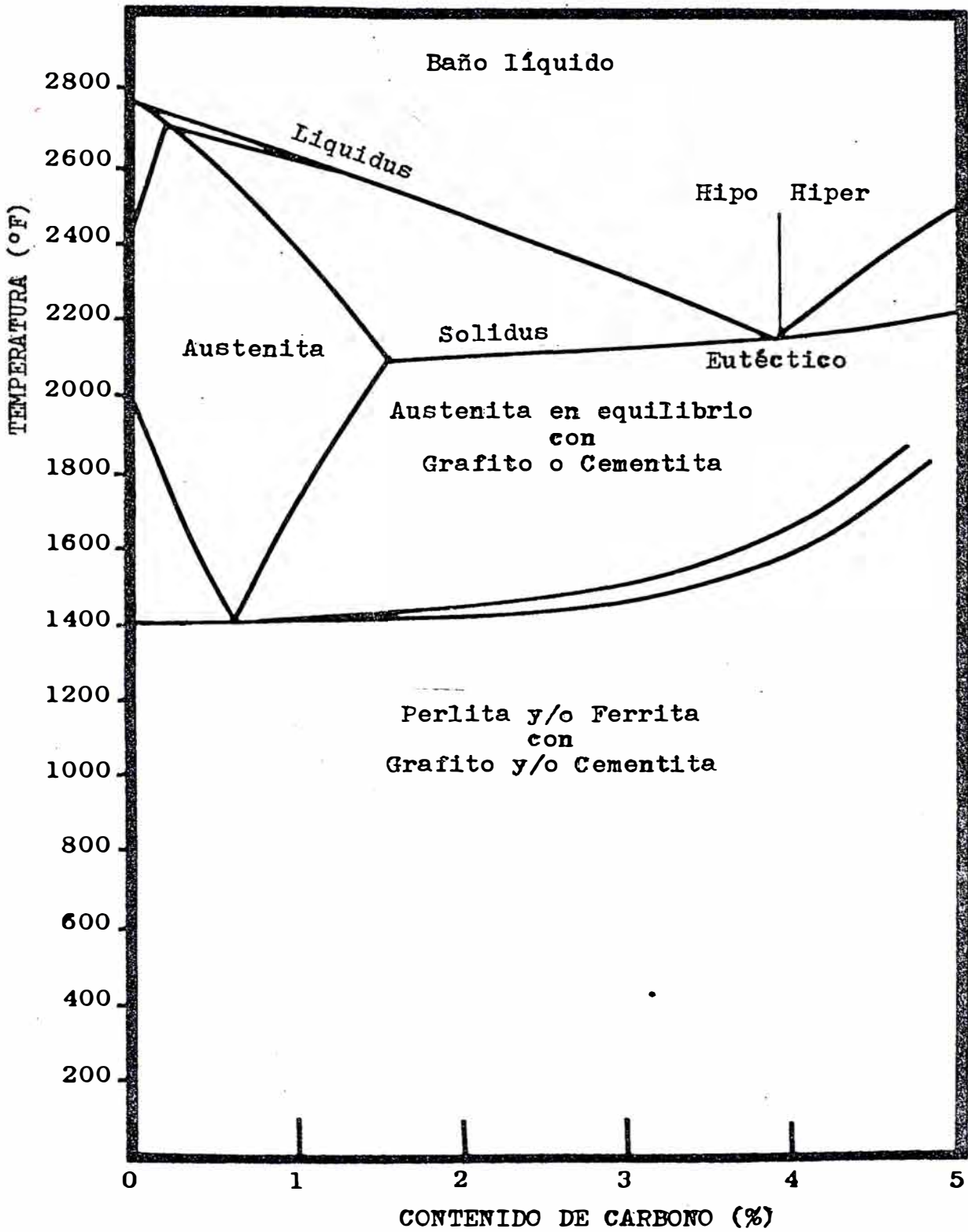


FIGURA 3.2.- Diagrama simplificado Fierro-Carbono, con 2.0% Si.

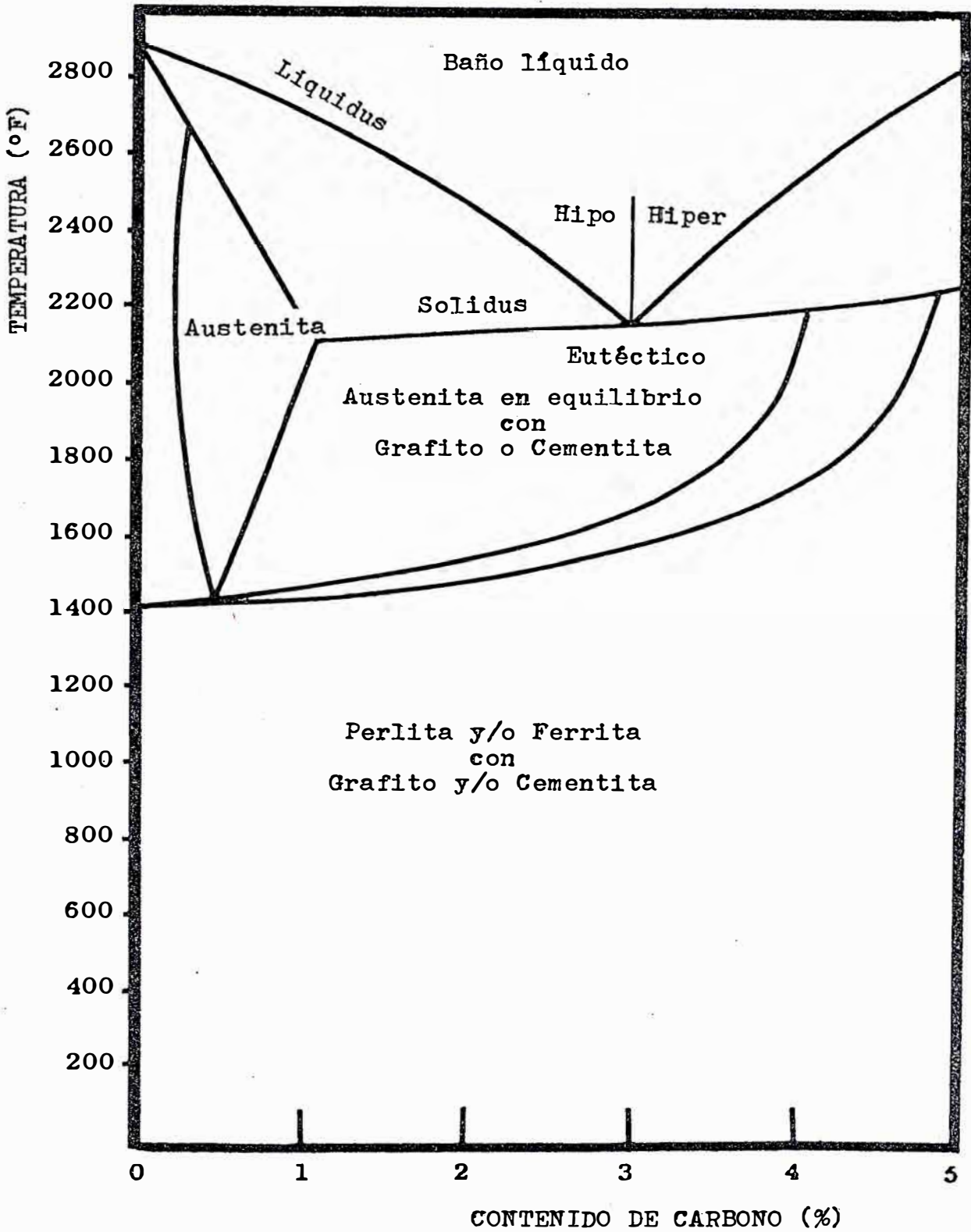


FIGURA 3.3.- Diagrama simplificado Fierro-Carbono, con 4.0% Si.

de las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3 en el sistema Fe-C-Si. Presentamos a continuación, un grupo de definiciones a emplearse para interpretar el siguiente grupo de diagramas de equilibrio.

- Temperatura de liquidus.- Temperatura a la cual comienza la solidificación de una aleación.
- Temperatura de solidus.- Temperatura a la cual se completa la solidificación de una aleación.
- Eutéctico.- Es la temperatura de fusión o de solidificación de una aleación, más baja. En este caso de la solidificación del hierro fundido, es instantánea a la temperatura eutéctica.
- Austenita.- En el caso del hierro fundido, la austenita es una solución sólida de Fe, C y Si, que existe desde la temperatura del liquidus a la temperatura crítica inferior.
- Ferrita.- Este componente existe en la forma de Fe libre de C o una aleación Fe-Si libre de C, en un hierro fundido.
- Cementita.- La cementita es un término usado para describir un carburo de Fe,  $Fe_3C$ , un compuesto conteniendo 6.67 %C y Fe.
- Perlita.- Este componente es un producto de la descomposición de la austenita en un enfriamiento lento, y consiste en capas o placas de cementita intercaladas con ferrita.

Los fierros fundidos comerciales pueden contener tan poco como 2 %C y tanto como 4 %C. El contenido de Si varía en el rango de 1.5 a 3 %Si. Con la excepción del C, el Si es el único otro elemento que ejerce una influencia dominante sobre el sistema de equilibrio. El efecto del Si sobre las propiedades mecánicas es similar al del C, sin embargo, no es tan pronunciado. Esta similitud está demostrada en el diagrama de fases ternario Fe-C-Si, de la Figura 3.4 y se refleja en la muy conocida fórmula del carbono equivalente con sus variaciones. La composición eutéctica de Fe y C es 4.26 %C. Por debajo de este valor la aleación Fe-C es hipoeutéctica y por encima de 4.26 %C, la aleación es considerada hipereutéctica. Esto se presenta en el diagrama Fe-C, Figura 3.1. En esta circunstancia particular, cuando se considera al hierro con un contenido de 0.0 %Si, la temperatura eutéctica es 1,154.4 °C. Las Figuras 3.2 y 3.3 son diagramas de equilibrio para un hierro con contenidos de 2.00 %Si y 4.00 %Si. Observar que hay un incremento general en la temperatura del solidus y

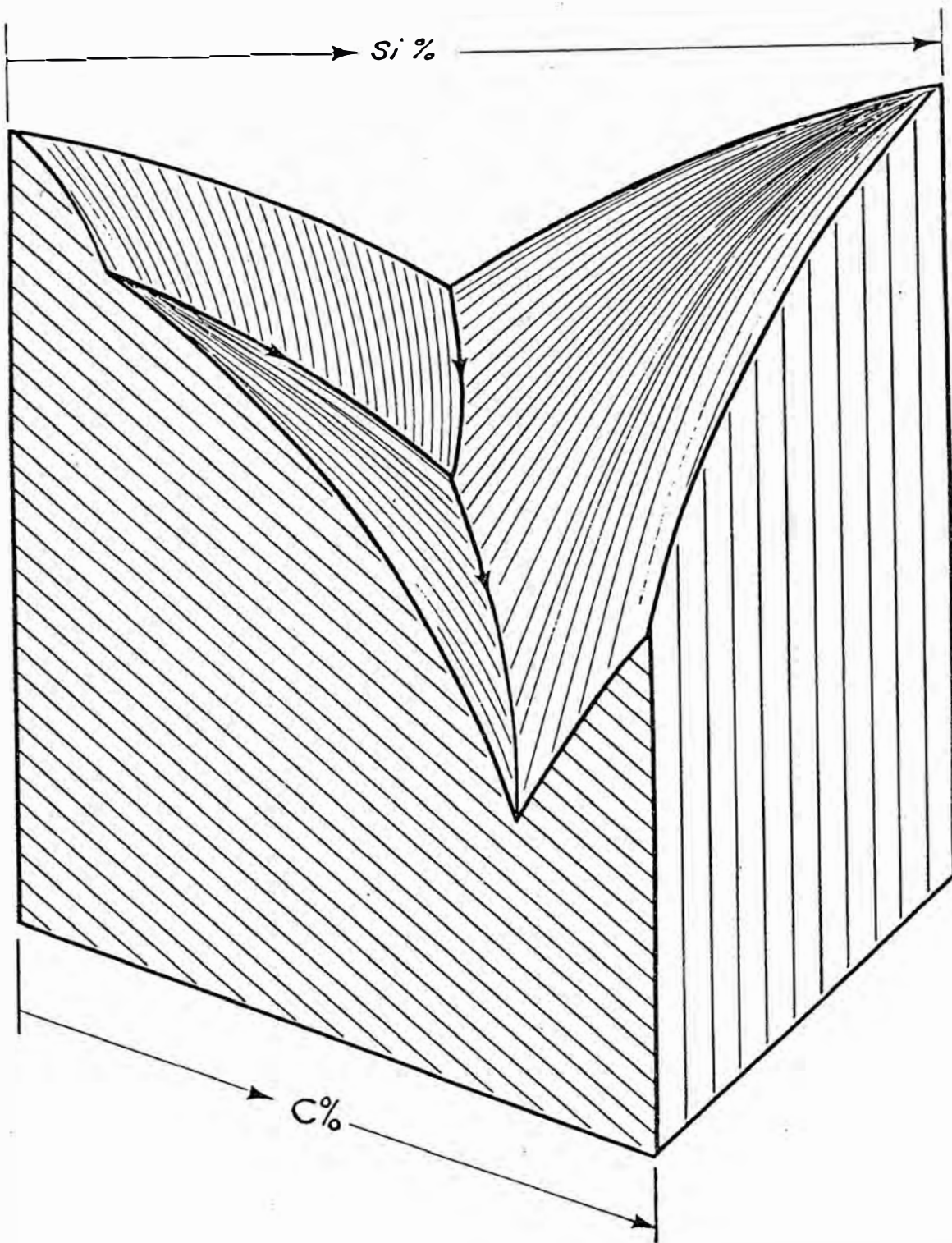


FIGURA 3.4.- Sección tri-dimensional del Diagrama Fierro Carbono Silicio.

del eutéctico, a medida que el contenido de Si del Fe, aumenta. La Figura 3.4 es un diagrama de equilibrio ternario Fe-C-Si, en 3 dimensiones. La cara frontal del diagrama es el diagrama Fe-C, el cual es el mismo de la Figura 3.1. El lado posterior de este diagrama tridimensional es una sección que corresponde al eje D que bisecta el diagrama Fe-C-Si. La ubicación de las Figuras 3.2 y 3.3, son indicadas en el diagrama ternario como segmentos. Este diagrama espacial fue desarrollado principalmente para demostrar esta pendiente y dirección relacionadas a la temperatura y composición del valle eutéctico, la pendiente del liquidus hipoeutéctico y la pendiente del liquidus hipereutéctico. Hasta hace poco se consideraba que la relación del carbono equivalente estaba representada por la siguiente ecuación básica:

$$\begin{aligned} \text{CE} &= \text{Carbono total} + 1/3 \text{ Silicio} \\ \text{ó} \quad 4.3\% &= \text{Carbono total} + 1/3 \text{ Silicio} \end{aligned}$$

Esta ecuación particular es, básicamente, una generalización. Recientemente, se han usado mucho como herramientas del control de fusión, dispositivos que registran la "parada" eutéctica. Como resultado de este nuevo interés, un número de investigadores revisaron la relación entre la composición y las temperaturas de transformación. La reciente información desarrollada tiende a clarificar algunas de las discrepancias que se han presentado cuando la ecuación general  $\text{CE} = \text{C} + 1/3 \text{ Si}$  se usó para determinar los valores de C y Si a partir de los datos de la "parada" eutéctica. Por ejemplo, se ha establecido que existe un número de variaciones en el factor del Si, en las ecuaciones del carbono equivalente (CE).

- 1)  $4.26 = \text{Carbono} + 0.317 \text{ Silicio} + 0.5 \text{ Fósforo}$   
El factor del silicio eutéctico.
- 2)  $4.26 = \text{Carbono} + \text{Silicio} + 0.5 \text{ Fósforo}$   
El factor del silicio para la pendiente hipereutéctica del diagrama Fe-C-Si.
- 3)  $4.26 = \text{Carbono} + 0.317 \text{ a } 0.25 \text{ Silicio} + 0.5 \text{ Fósforo}$   
Variaciones en el factor del silicio sobre la pendiente hipoeutéctica del diagrama Fe-C-Si.

El factor del Si disminuye con el incremento de la temperatura del

liquidus sobre el lado hipoeutéctico de la pendiente del liquidus. Un factor del Si adecuado para los valores del carbono equivalente en el rango de 3.00 a 4.00%, está en el área de 0.30.

La mayoría de las fundiciones nodulares producidas, son eutécticas o hipereutécticas. La porción de C presente en aquellos fierros, en exceso del eutéctico, se precipita del hierro fundido como grafito esferoidal. Estos esferoides en exceso flotan en la superficie de la pieza. A medida que la temperatura del metal decrece hacia la temperatura del solidus, la solidificación eutéctica ocurre con la precipitación de austenita y grafito esferoidal. De este modo, en la fundición nodular hipereutéctica, puede existir en cada célula eutéctica más de un nódulo o aglomerado de grafito. En la fundición nodular hipoeutéctica no existe flotación del C, donde la solidificación eutéctica es precedida por la precipitación de la austenita. En este caso, solamente existe un nódulo en cada célula eutéctica.

Por debajo del solidus, existe austenita sólida con grafito esferoidal y carburos con rápidas velocidades de enfriamiento. El manto o capa de austenita restringirá el flujo de los átomos de C al núcleo, y esto puede explicar la gran tendencia al sobreenfriamiento en los fierros tratados con Mg.

La austenita se transforma en la temperatura crítica a ferrita y grafito, con tal que la composición sea ajustada. De lo contrario, los esferoides se encontrarán embebidos en la perlita o en una mezcla de perlita y ferrita. La perlita consiste de lamelas alternadas de ferrita y cementita, y es reversible por el recalentamiento o enfriamiento. El C de la lamela del carburo migra a los esferoides existentes. Este cambio de fase es marcado por una liberación de calor en la curva de enfriamiento como se muestra por una "parada" o "interrupción". Cuando se recalienta, el cambio de fase está acompañado por la absorción de calor.

Las fundiciones nodulares con estructuras de matriz austenítica, martensítica o bainítica (acicular), pueden producirse por adecuados aleantes y/o tratamientos térmicos.

### 3.2. ¿POR QUE GRAFITO ESFEROIDAL?

Con las fundiciones nodulares disponibles se pueden obtener un rango

muy amplio de propiedades mecánicas y físicas. Este amplio espectro, se obtiene por un control de la composición y la influencia de los elementos sobre los constituyentes de la matriz. En una forma general, los elementos se comportan como en los fierros de grafito laminar o en los aceros. La principal diferencia entre una fundición gris y una fundición nodular, es la forma en que se presenta el grafito. La fundición nodular tiene su grafito como esferoides compactos o esferulitas o nódulos, mientras que el grafito en la fundición gris es precipitado como láminas.

Hay muchos elementos que reaccionan con el hierro base, produciendo las condiciones que originan que el grafito precipite en la forma esferoidal o compactado. Los metales raros alcalinos que incluyen al Mg, Ca y metales de las tierras raras tales como, cerio (Ce), lantano (La) e itrio (Y), todos promueven la formación del grafito esferoidal o compactado.

Estos elementos que promueven la precipitación del grafito como esferoides, desoxidan efectivamente el baño ( $0.002 \%O_2$ ) y reducen el S a niveles tan bajos (0.01 a 0.003%) cuando están presentes en cantidades superiores a 0.015% del contenido de S residual. Los elementos esferoidizantes o nodulizantes son todos reconocidos por ser muy potentes estabilizadores de carburos.

Se ha puesto mucha atención y está tratándose de determinar el mecanismo de esferoidización. Estos estudios son extremadamente dificultosos, debido a que están involucradas altas temperaturas y se ofrecen en la literatura muchas teorías o hipótesis. No intentamos revisar estas teorías, sólo enfatizaremos que el mecanismo exacto de formación no es conocido, que la solidificación de los fierros tratados con Mg es una transformación eutéctica y que el número de esferoides no aumenta después de la solidificación eutéctica. El crecimiento de los esferoides de grafito se ve rodeado por la simultánea precipitación de la austenita y el aumento del esferoide (crecimiento) se realiza por la difusión del C a través del manto de austenita que lo rodea.

### 3.3. CLASIFICACION DE LA FUNDICION NODULAR

La A.S.T.M. ha establecido estándares para la clasificación del grafito en la fundición nodular, en términos de tipo, tamaño y distribución. El método implica la comparación de microestructuras con aquellas de las cartas standard, según la cual se establecen las categorías. Ejemplos de estas cartas



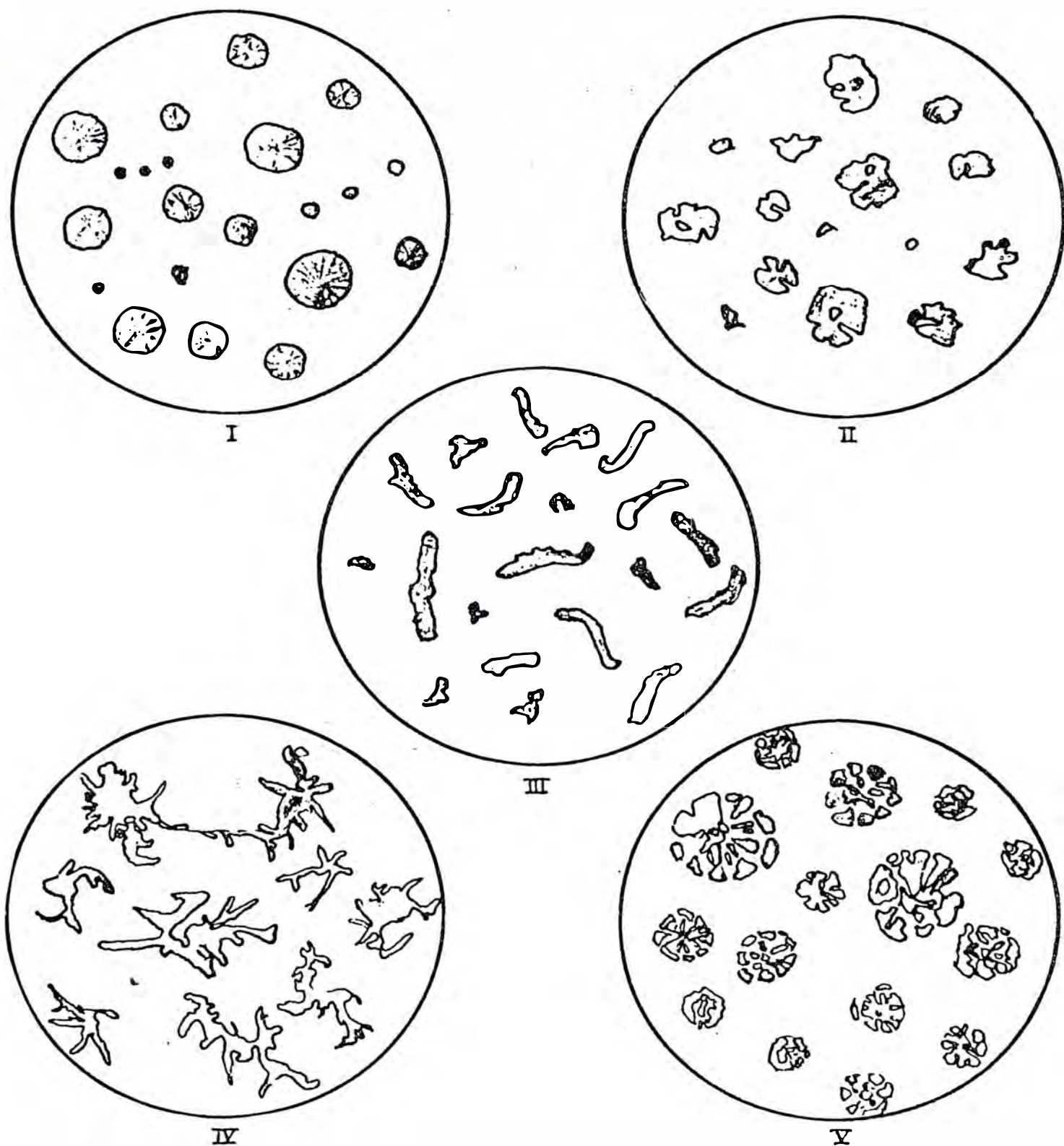
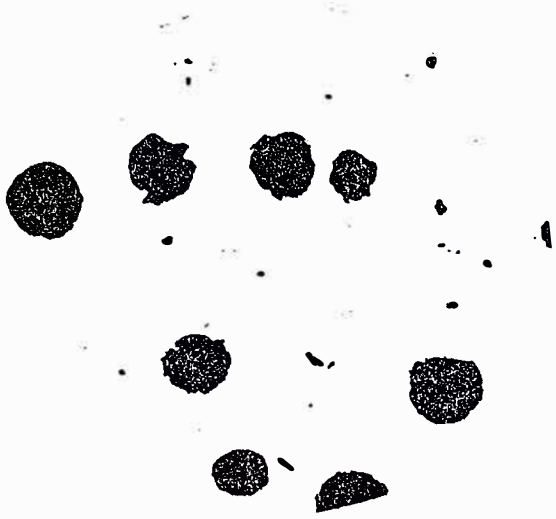
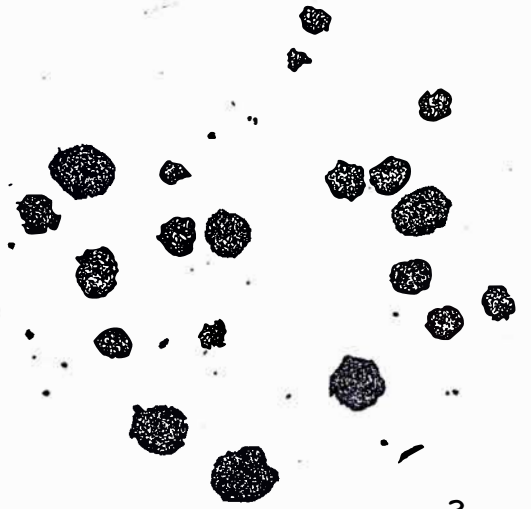


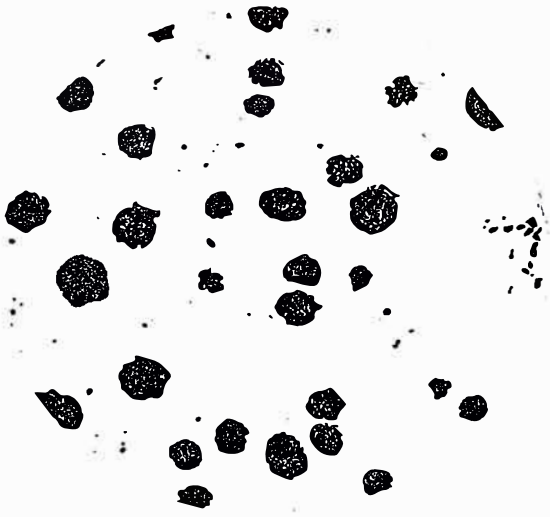
FIGURA 3.5.- Clasificación de las formas del grafito que aparecen en la fundición nodular, a 100 X. Propuesto por C. K. Donoho.



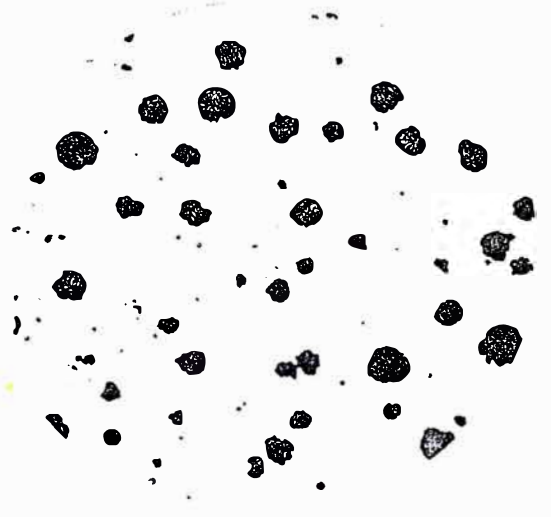
(1) 25 nódulos por  $\text{mm}^2$



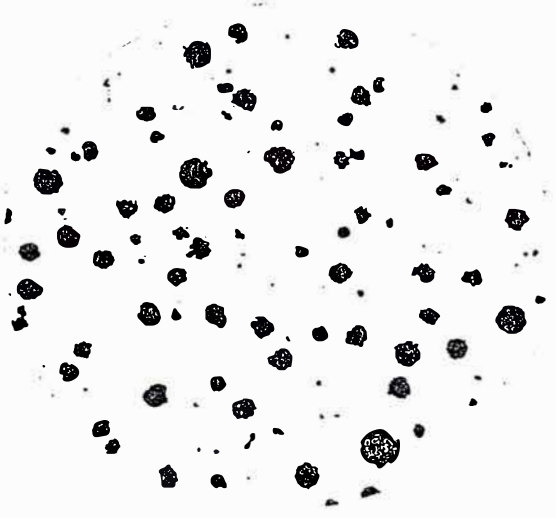
(2) 50 nódulos por  $\text{mm}^2$



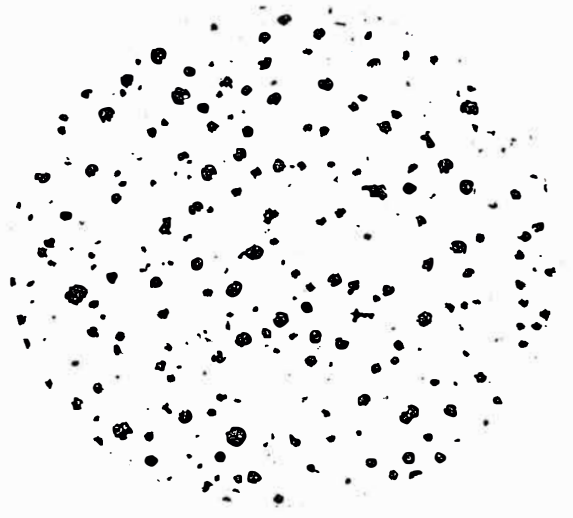
(3) 75 nódulos por  $\text{mm}^2$



(4) 100 nódulos por  $\text{mm}^2$



(5) 150 nódulos por  $\text{mm}^2$



(6) 300 nódulos por  $\text{mm}^2$

FIGURA 3.6.- A 100 X.

se presentan en la Figura 3.5. La clasificación del tamaño de grafito, está de acuerdo con la Tabla 3.1 y la Figura 3.6.

TABLA 3.1.- TAMAÑO DEL GRAFITO

<u>Clase de Tamaño</u>	<u>Máxima dimensión a 100 X, mm</u>
1	128
2	64
3	32
4	16
5	8
6	4
7	2
8	1

#### 3.4. GRAFITO ESFEROIDAL - MICROESTRUCTURAS

Las siguientes son microfotografías de formas de grafito que pueden encontrarse en la producción de las fundiciones nodulares. Las condiciones asociadas con la formación de un grafito en particular, se describen bajo cada microfotografía.

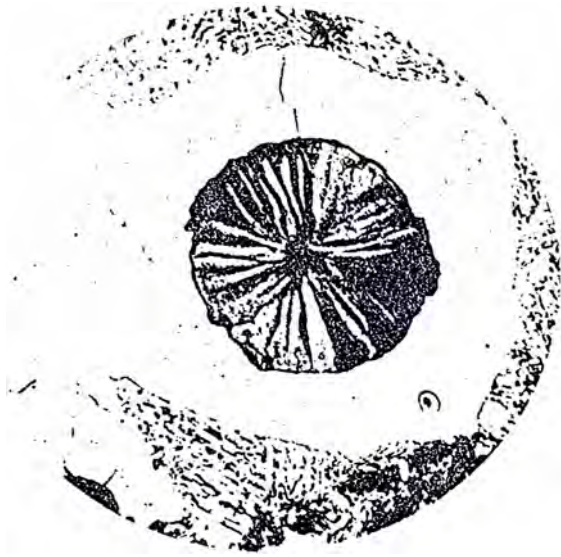


FIGURA 3.7.- Nódulo de grafito con un anillo de ferrita dentro de una matriz de perlita, a 500 X.

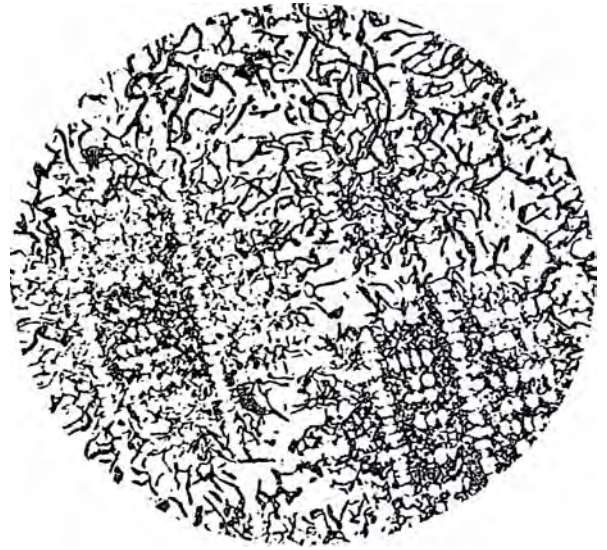


FIGURA 3.8.- Fundición gris presentando grafito fino in terdendrítico, a 100 X.



FIGURA 3.9.- Grafito vermicular y pocos nódulos con láminas, producidos por un bajo tratamiento - bajo Mg, sin ataque, a 100 X.

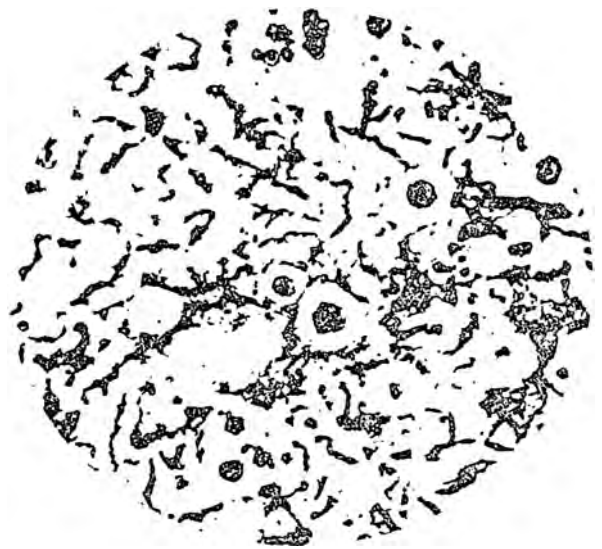


FIGURA 3.10.- Grafito vermicular y nódulos irregulares en una matriz principalmente ferrítica, a tacada con Nital al 2 %, a 100 X.

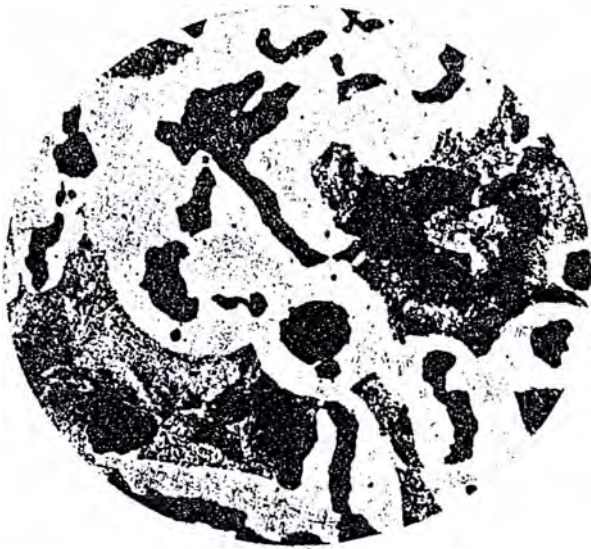


FIGURA 3.11.- Grafito vermicular y pocos nódulos irregulares en una matriz perlítica ferrítica, atacada con Nital al 2%, a 250 X.



FIGURA 3.12.- Nódulos irregulares, extremadamente gruesos, formación vermicular en una matriz perlítica ferrítica, atacada con Nital al 2%, a 250 X.



FIGURA 3.13.- Grafito irregular en una matriz carbúrica, producido por un sobre tratamiento con Ce (0.20 %Ce), atacada con Nital al 2%, a 250 X.



FIGURA 3.14.- "Malla" de grafito o riginado por la contaminación del Pb, atacada con Nital al 2%, a 1,000 X.



FIGURA 3.15.- Grafito chunks en una sección gruesa de una pieza de fundición nodular, atacada con Nital al 2%, a 100 X.

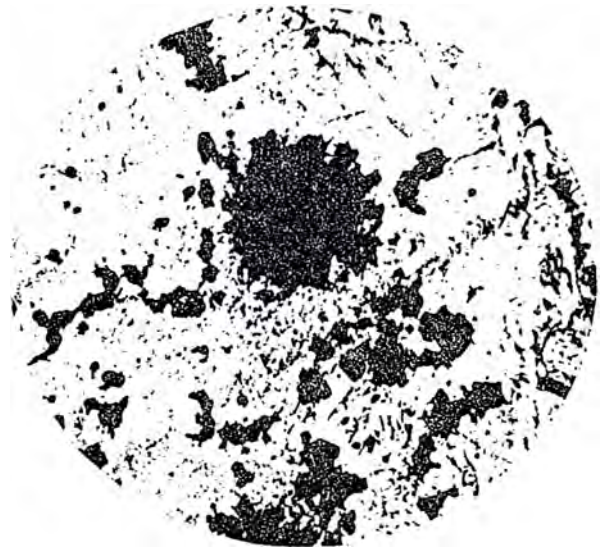


FIGURA 3.16.- Grafito irregular, láminas aglomeradas en una matriz carbúrica, atacada con Nital al 2%, a 250 X.



FIGURA 3.17.- Flotación del carbono. La cantidad de nódulos es muy alta y hay muchos nódulos explotados en la parte superior de la sección gruesa de una pieza, sin ataque, a 35 X.

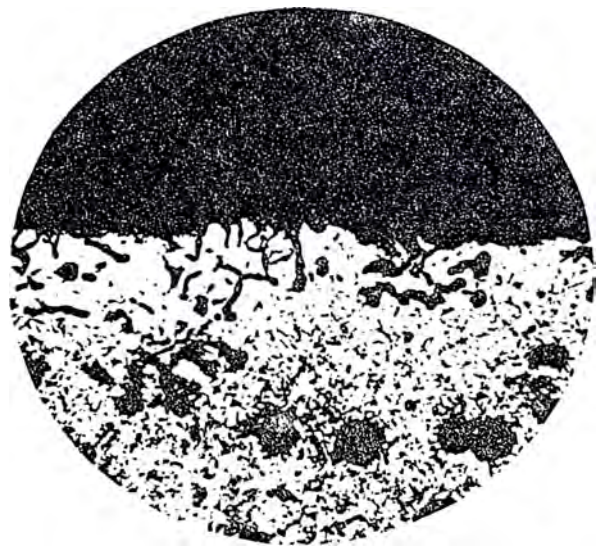


FIGURA 3.18.- Capa superficial de grafito laminar originado por la reversión del SMg de la escoria de una fundición nodular producida de un hierro base de alto S, atacada con Nital al 2%, a 100 X.

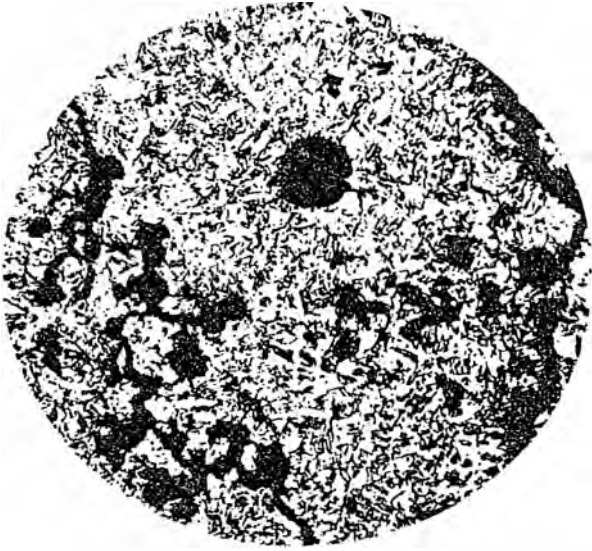


FIGURA 3.19.- Rajadura siguiendo el modelo del grafito vermicular en la matriz, atacada con Nital al 2%, a 100 X.

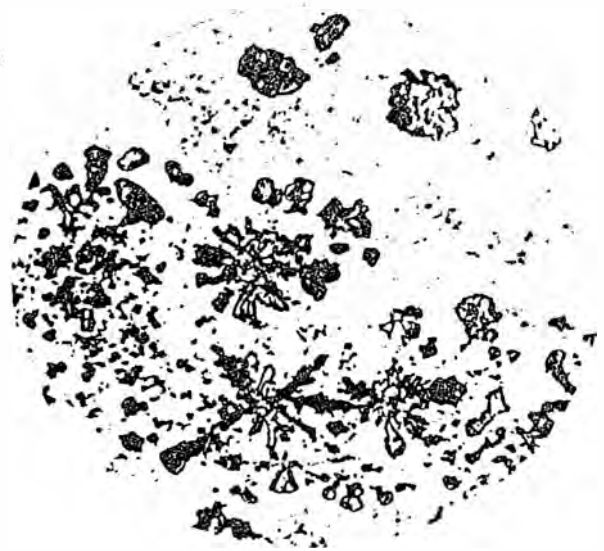


FIGURA 3.20.- Grafito explotado en una sección gruesa de una pieza de fundición nodular hiper eutética, atacada con Nital al 2%, a 100 X.



FIGURA 3.21.- Nódulos irregulares de grafito y grafito chunk, atacada con Nital al 2%, a 250 X.

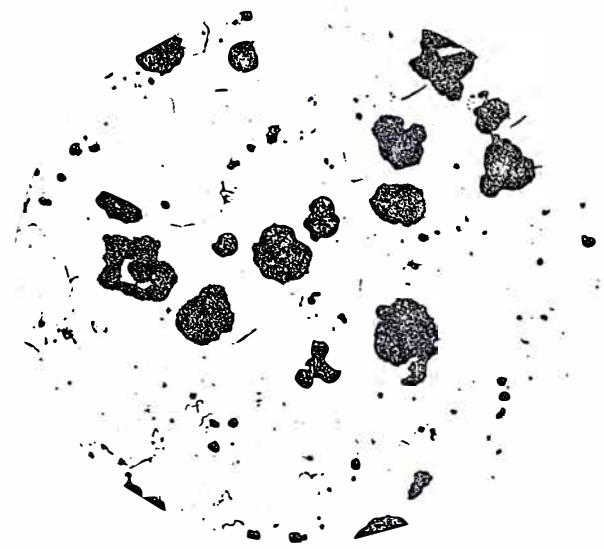


FIGURA 3.22.- Grafito irregular en una matriz ferrítica, atacada con Nital al 2%, a 250 X.

### 3.5. INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS PRIMARIOS EN LA FUNDICION NODULAR

a) CARBONO.- En vista de que el rango de C, en las fundiciones nodulares comerciales, cae entre 3.0 y 4.0%, el contenido de C total, usualmente, está en el rango de 3.60 a 3.80%, siendo el porcentaje mayor para piezas delgadas con secciones por debajo de 3/8" y contenidos de C en el rango inferior para secciones gruesas en piezas con secciones superiores a 1 1/2". En las fundiciones nodulares comerciales, el C como esferoides ocupa alrededor del 9% del volumen. Incrementando el contenido de C, puede promoverse una gran cantidad de nódulos. Altos contenidos de C benefician la colabilidad, por la mejora de la fluidez del metal.

Ocasionalmente, cuando se requiere un grano fino en secciones muy gruesas, se emplean deliberadamente composiciones hipereutécticas cuando la capa de grafito flotado puede eliminarse por maquinado o se localiza en áreas no críticas.

En la fundición de piezas centrífugas, tales como las tuberías de presión, el contenido de C total deseado es aproximadamente 3.5%, para minimizar las "arrugas". El "defecto de arrugas" es algo similar al defecto de la flotación del carbono, que se describirá en el Capítulo XII

El C ejerce sólo una menor influencia sobre las propiedades mecánicas de la fundición nodular. La resistencia a la tracción se reduce en alrededor de 0.25 Kg/mm<sup>2</sup> por cada 0.10% y la pérdida en el límite de fluencia es algo mayor. La dureza Brinell disminuye en casi 5 por cada 0.15 %C adicional y aumenta la elongación, particularmente en la estructura de bruto de colada. El C afecta al módulo de elasticidad en proporción a su volumen en la matriz. Aumentando el contenido de C, también tiende a mejorarse la absorción de energía o propiedades de impacto.

Ejercer el control, relacionando el C y el Si con la fórmula del carbono equivalente. Para piezas de secciones livianas (menores de 1/2"), es recomendable un carbono equivalente hipereutéctico con un máximo de 4.55%; para rangos intermedios (secciones de 1/2" a 1 1/2") un hierro eutéctico de carbono equivalente igual a 4.30%. Para secciones gruesas (mayores de 2"), la composición química debe ser hipoeutéctica con un máximo de 4.30% de carbono equivalente.



b) SILICIO.- El rango usual del Si en los grados de ingeniería de la fundición nodular, es de 1.80% a 2.80%. Algunos tipos de fierros resistentes al calor y a la oxidación contienen hasta 6.0 %Si.

Como se discutió previamente, el contenido de Si interactúa con el C en el control del carbono equivalente en las fundiciones grises y nodulares. Este elemento es un desoxidante y un potente grafitizador. Generalmente, incrementa el número de esferoides de grafito y disminuye el tamaño de las células eutécticas en la fundición nodular. De este modo, un fierro con alto contenido de C, el cual contiene bajo Si (2.00%) solidificará con una gran cantidad de carburos primarios presentes en la matriz, como se muestra en la Figura 3.23. El Si disocia los carburos de Fe primarios, y suprime la formación de la perlita dando preferencia a la formación de grafito y ferrita en la fundición nodular en bruto de colada, como se ilustra en las Figuras 3.23, 3.24, 3.25 y 3.26.

El Si se emplea, usualmente FeSi al 75%, como un inoculante para minimizar o eliminar los carburos primarios en la fundición nodular. Se obtienen beneficios muy significativos con adiciones finales de 0.50% a 1.00 %Si, como inoculación a la fundición nodular. Esta es una de las partes esenciales del tratamiento descrito detalladamente en el Capítulo VII.

Un incremento de 1.00 %Si en las fundiciones nodulares ferríticas, eleva la resistencia a la tracción en aproximadamente  $7.03 \text{ Kg/mm}^2$  y el límite de fluencia en casi  $11.25 \text{ Kg/mm}^2$ , mientras que la elongación disminuye en casi 3% y aumenta la dureza en casi 30 BHN, para información adicional ver la Tabla 3.2. El Si tiende a disminuir la resistencia al impacto de la fundición nodular, especialmente a bajas temperaturas. A medida que aumenta el contenido de Si, incrementa la temperatura de transición tenaz a frágil, como se muestra en las Figuras 3.28 y 3.29. Por esta razón, el contenido de Si en piezas de aplicaciones marinas a usarse en climas fríos, se mantiene en 2.50% como máximo.

En las fundiciones nodulares perlíticas, las propiedades de impacto son relativamente bajas y la diferencia entre el rango de transición tenaz a frágil, es relativamente pequeña.

La influencia del Si a varios niveles de Mn, se presenta en la Tabla 3.2 y se plotea gráficamente en las Figuras 3.30 y 3.31.



FIGURA 3.23.- Fundición nodular en bruto de colada, atacada con Nital al 2%, a 250 X.

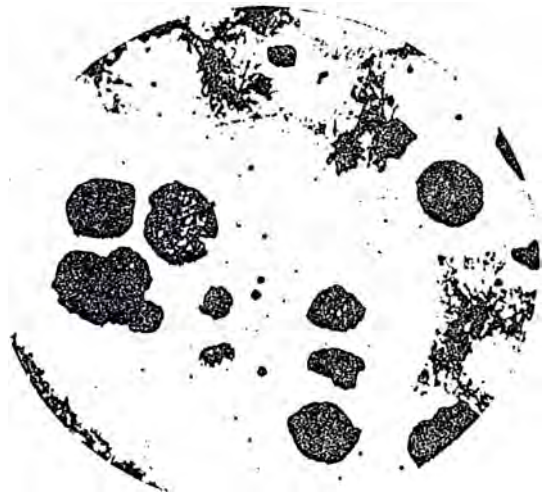


FIGURA 3.24.- Fundición nodular en bruto de colada, atacada con Nital al 2%, a 250 X.

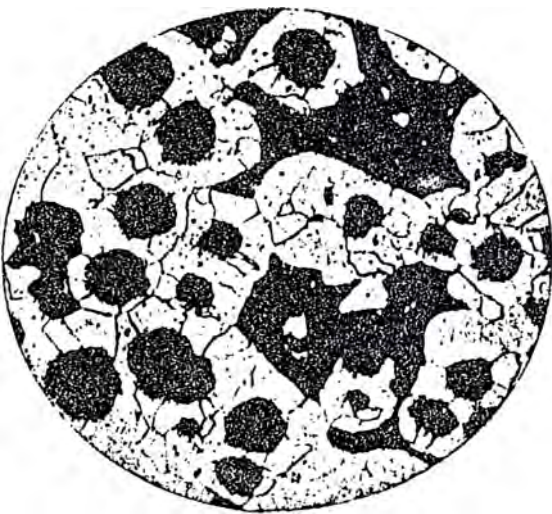


FIGURA 3.25.- Fundición nodular en bruto de colada, atacada con Nital al 2%, a 150 X. Si 2.29%; C total 3.60%; Mn 0.09%; P 0.06%

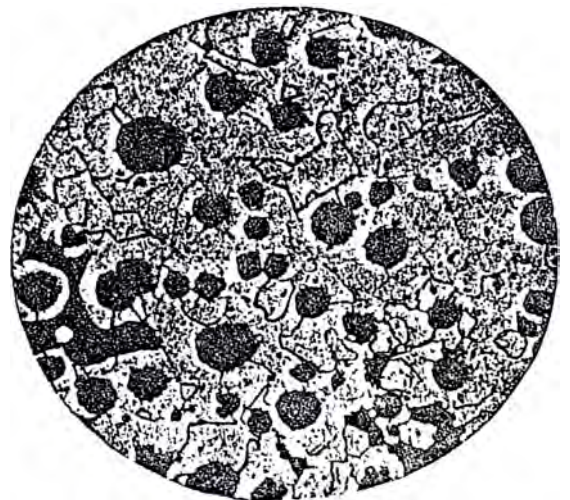


FIGURA 3.26.- Fundición nodular en bruto de colada, atacada con Nital al 2%, a 150 X. Si 3.12%

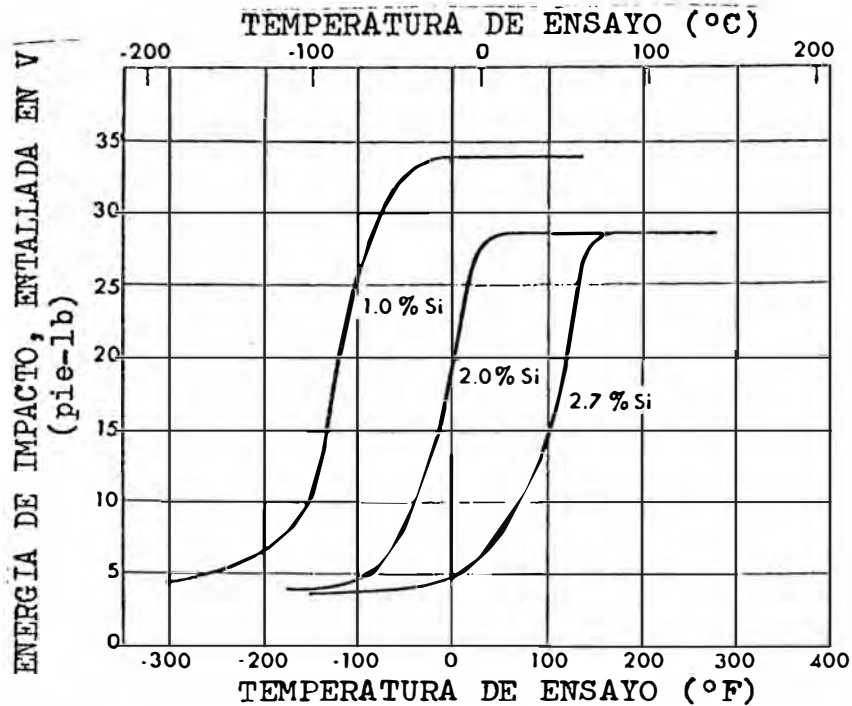


FIGURA 3.27.- Efecto del contenido de Si sobre las propiedades de impacto y temperaturas de transición, de fundiciones nodulares recocidas, ferríticas, en probetas de ensayo Charpy entalladas en V.

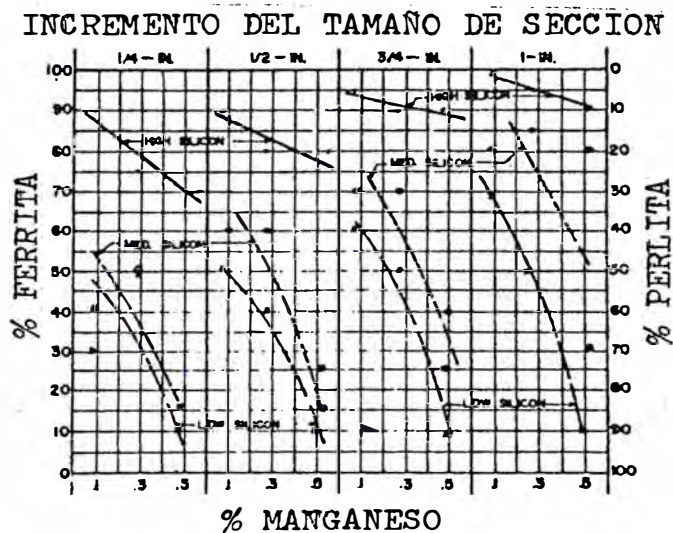


FIGURA 3.28.- Influencia del Si y Mn sobre los porcentajes de ferrita y perlita, en fundiciones nodulares en bruto de colada, variando el tamaño de sección.

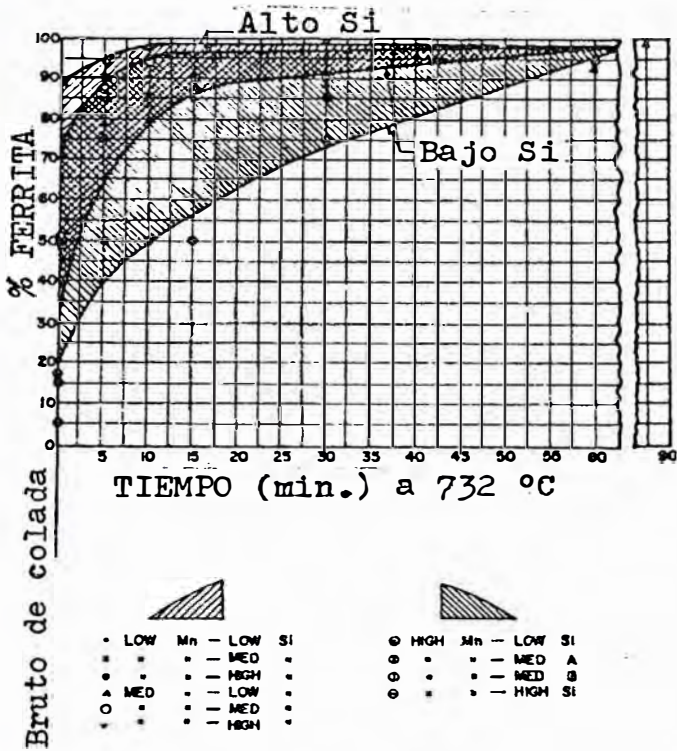


FIGURA 3.29.- Influencia del Si y Mn, sobre la sensibilidad al ferritizado.

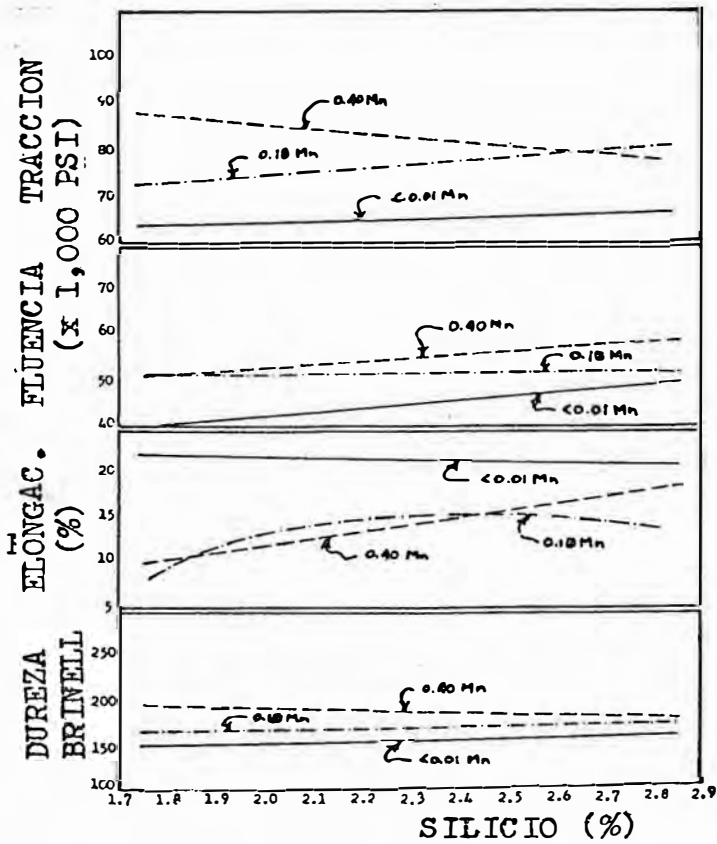


FIGURA 3.30.- Propiedades de la fundición nodular en bruto de colada, a niveles constantes de Mn, variando el Si.

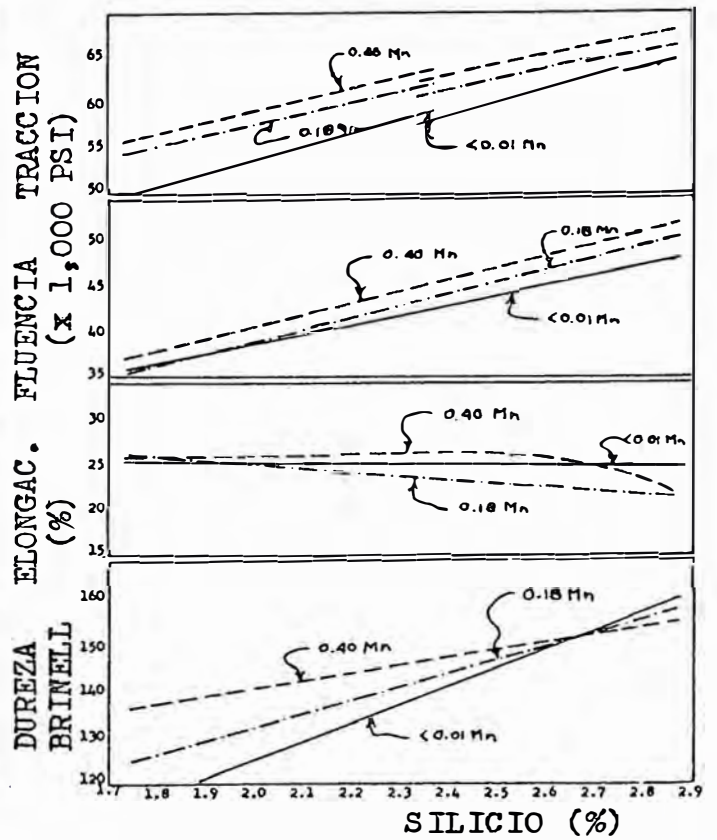


FIGURA 3.31.- Propiedades de la fundición nodular recocida, a niveles constantes de Mn, variando el Si.

TABLA 3.2.- EFECTO DEL SILICIO SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS

	Colada 1	Colada 2	Colada 3	Colada 4
Carbono total	3.44%	3.37%	3.38%	3.42%
Silicio	1.90	2.45	2.60	2.89
Manganeso	0.01	0.01	0.01	0.39
Níquel	0.01	0.01	0.01	0.06
Cromo	0.025	0.025	0.025	0.025
Magnesio	0.050	0.059	0.069	0.048
Cobre	0.012	0.01	0.01	0.01
Fósforo	0.030	0.028	0.028	0.033
Azufre	0.015	0.017	0.015	0.015
Carbono equivalente	4.01	4.11	4.16	4.29
Bruto de colada				
%Ferrita	95	95	95	80
%Perlita	5	5	5	20
Resistencia a la tracción, Kg/mm <sup>2</sup>	45.14	44.65	47.32	53.57
Límite de fluencia, Kg/mm <sup>2</sup>	29.11	31.50	34.38	41.90
Elongación, %	22.6	23.9	18.5	18.5
BHN	152	152	156	179
Recocido				
Resistencia a la tracción, Kg/mm <sup>2</sup>	37.44	41.20	44.43	47.67
Límite de fluencia, Kg/mm <sup>2</sup>	26.58	29.88	32.90	36.28
Elongación, %	25.9	25.1	25.3	22.1
BHN	121	143	149	149
	Colada 5	Colada 6	Colada 7	Colada 8
Carbono total	3.65%	3.65%	3.66%	3.66%
Silicio	1.87	2.41	2.72	2.01
Manganeso	0.18	0.18	0.18	0.38
Níquel	0.01	0.01	0.01	0.01
Cromo	0.025	0.022	0.028	0.025
Magnesio	0.033	0.045	0.044	0.045
Cobre	0.01	0.01	0.01	0.01
Fósforo	0.030	0.030	0.030	0.030
Azufre	0.017	0.014	0.015	0.012
Carbono equivalente	4.21	4.37	4.48	4.26
Bruto de colada				
%Ferrita	60	60	50	40
%Perlita	40	40	50	60
Resistencia a la tracción, Kg/mm <sup>2</sup>	52.31	53.29	56.46	55.61
Límite de fluencia, Kg/mm <sup>2</sup>	35.44	35.93	35.93	37.76
Elongación, %	12.1	14.8	14.2	11.8
BHN	163	170	170	179
Recocido				
Resistencia a la tracción, Kg/mm <sup>2</sup>	39.02	42.26	45.74	43.31
Límite de fluencia, Kg/mm <sup>2</sup>	25.52	29.11	32.83	30.16
BHN	128	139	152	143

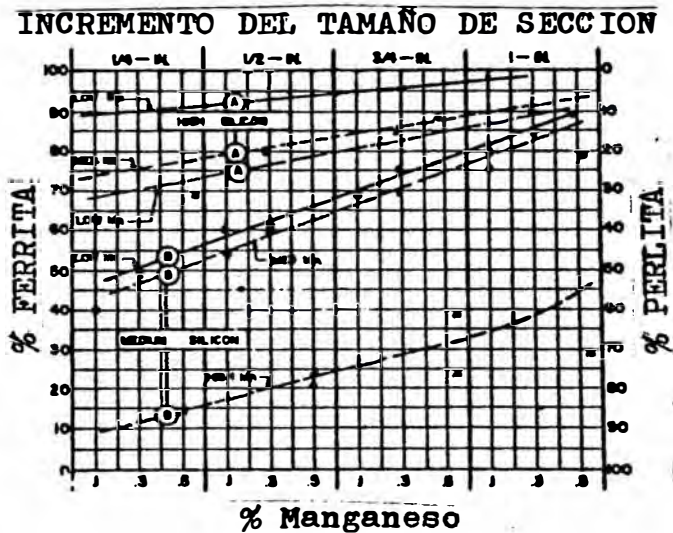


FIGURA 3.32.- Influencia del Si y Mn sobre el porcentaje de ferrita y perlita, en la microestructura de la fundición nodular en bruto de colada.

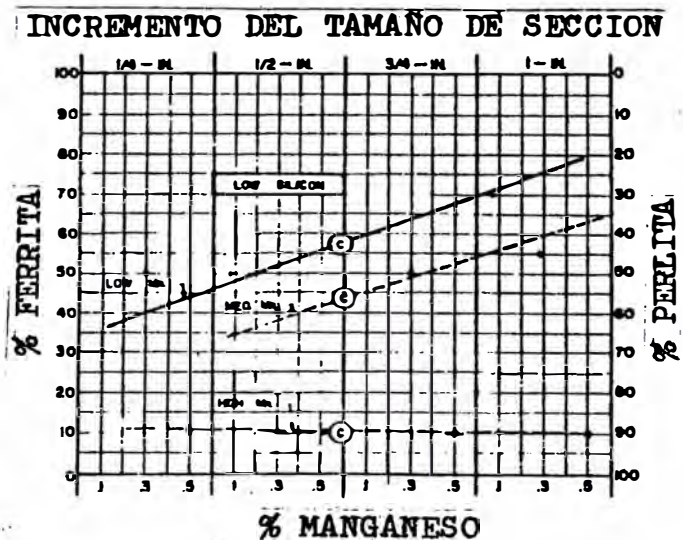


FIGURA 3.33.- Influencia del Si y Mn sobre el porcentaje de ferrita y perlita, en la microestructura de la fundición nodular en bruto de colada.

El Si contribuye en algo sobre la resistencia a la tracción y el límite de fluencia de la estructura en bruto de colada, cuando el Mn está en niveles bajos. Con 0.40 %Mn, incrementando el contenido de Si disminuye la resistencia a la tracción a medida que la matriz se vuelve menos perlítica.

En el estado recocido, aumentando el Si se incrementa marcadamente el límite de fluencia y en menor grado la resistencia a la tracción y la dureza.

Esta serie de coladas se fundieron en hornos de inducción de 4,200 ciclos/seg. El Si y Mn se añadieron como ferroaleaciones, mientras que el tratamiento consistió en sumergir con un émbolo una aleación de ferrosilicio con 9.3 %Mg (1.58%), dentro del baño a 1,593 °C. Estos baños se post-inocularon con 1.11 %Si añadido como FeSi al 85%, durante la transferencia a la cuchara.

El tratamiento térmico consistió de una austenización a 927 °C por 1 1/2 horas, enfriamiento lento a 732 °C por 2 horas para ferritizar y luego enfriamiento en el horno hasta la temperatura ambiente.

c) AZUFRE.- Usualmente, el contenido final de S en la fundición nodular es de 0.005% a 0.015% y debe ser siempre menor a 0.02%. La eliminación del S a niveles bajos es una parte esencial del proceso. El S se combina con el Mg para formar sulfuros estables de Mg. La economía y la calidad impone el empleo de materiales en la carga con bajos contenidos de S. Los procesos de fusión que no contribuyen sino por el contrario quitan S, obviamente, son ventajosos. El sulfuro de Mg atrapado, se observa como una escoria que perjudica la calidad y es una gran evidencia del alto %S en el hierro base. El contenido de S del hierro base afecta significativamente la cantidad de Mg residual necesaria para promover y mantener la esferoidización del grafito.

Cuando se trata un hierro base con relativamente alto contenido de S, se necesita un exceso de Mg para resistir la reversión a un hierro con grafito laminar. La razón para esto, está en la inestabilidad del sulfuro de Mg (MgS) en el hierro fundido. Este se oxida a óxido de Mg (MgO) y silicato de Mg (MgSiO<sub>3</sub>). La única forma de reversión o pérdida, puede evitarse teniendo presente un elemento que forme un sulfuro estable, tal como un sulfuro de tierras raras. El contenido de Mg determinado espectro-químicamente, no diferencia en como está presente el Mg. Los compuestos de Mg, en este caso un sulfuro, puede redu -

cir la cantidad disponible de Mg para promover la formación de grafito esferoidal.

Puede obtenerse una excelente nodularidad con tan poco como 0.018% de Mg retenido. Este alto grado de nodularidad se encuentra en fierros producidos en cubilotes altamente básicos, donde el fierro no tratado tiene un %S entre 0.008% y 0.010%. En los fierros base fundidos en horno eléctrico, donde el contenido de S está entre 0.025% y 0.035%, se requiere un nivel mínimo de 0.04 %Mg, para obtener la calidad esferoidal. Coladas en cubilote ácido con un S base de 0.085% necesitan un contenido del Mg residual de casi 0.055% para asegurar en las piezas un buen grafito esferoidal.

d) FOSFORO.- El nivel máximo de P en el que es posible producir una fundición nodular satisfactoria, es 0.05%. Se prefiere un nivel de 0.035% o menos cuando se requiere una máxima ductilidad.

Como en la fundición gris, el P forma una red de un fosfuro (steadita) muy frágil. El P afecta adversamente la ductilidad, tenacidad y de este modo reduce seriamente la resistencia al impacto en piezas estáticas. Es por ello que los niveles de P deben mantenerse lo más bajo posible, particularmente si el fierro se va a usar en bruto de colada. Este elemento incrementa la dureza, estabiliza y refina la perlita. El P, particularmente por encima de 0.08%, eleva el rango de la temperatura de transición tenaz-frágil. El P aumenta significativamente la relación del límite de fluencia a la resistencia a la tracción.

TABLA 3.3.- EFECTO DEL FOSFORO SOBRE LAS PROPIEDADES EN BRUTO DE COLADA

	Colada 1	Colada 2	Colada 3
Carbono total (aproximado)	3.60%	3.60%	3.60%
Silicio	2.22	2.29	2.32
Manganeso	0.08	0.09	0.11
Fósforo	0.03	0.06	0.225
Azufre (aproximado)	0.01	0.01	0.01
Níquel	0.03	0.07	0.035
Magnesio	0.023	0.051	0.058
Resistencia a la tracción, Kg/mm <sup>2</sup>	50.06	50.55	54.84
Límite de fluencia, Kg/mm <sup>2</sup>	33.33	33.40	43.31
Elongación, %	20.2	11.5	3.0
BHN	159	167	229



De los datos anteriores, es obvio que hay un pequeño cambio en los valores del límite de fluencia o resistencia a la tracción en el rango normal, sin embargo la elongación sufre apreciablemente. El P aumenta la resistencia pero también fragiliza la ferrita en el estado de bruto de colada. Los valores de dureza aumentan con el incremento de P, particularmente en la estructura de bruto de colada. Los efectos adversos del P son ligeramente encubiertos por el tratamiento térmico y a veces altas concentraciones pueden producir resultados aceptables

El fosforo de Fe o red de steadita, se ilustra en la Figura 3.34



FIGURA 3.34.- Fotomicrografía de una fundición nodular, a 100 X, atacada con Nital. Presenta la segregación del fosforo en los bordes de grano.

e) MANGANESO.- El contenido usual de Mn para la fundición nodular ferrítica en bruto de colada es 0.20% máximo y para el grado perlítico es de 0.50% a 0.70%.

En ausencia de S, el Mn funciona como un aleante, estabilizando y refinando la perlita, de este modo disminuye la ferrita en la estructura de bruto de colada. Esto se observa en las Figuras 3.41 y 3.42. La función de promover la perlita de los fierros con alto contenido de Mn, es muy evidente, sin embargo la influencia del Si que es un ferritizante muy poderoso, puede contrarrestar largamente esta propensión del Mn a formar perlita. El efecto combinado del Mn y Si puede también evaluarse en las Figuras 3.30, 3.31, 3.32 y 3.33.

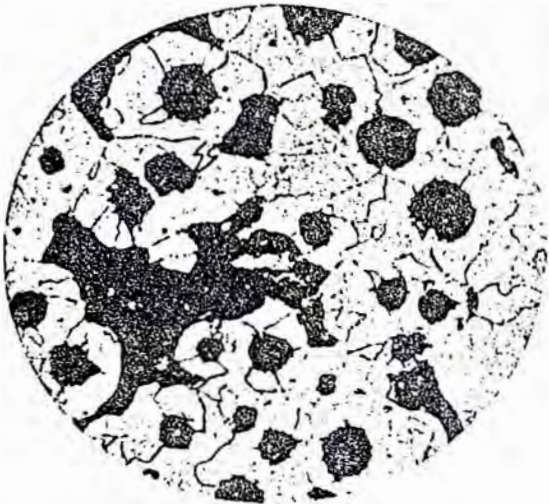


FIGURA 3.35.- Colada 1, 0.03 %P.

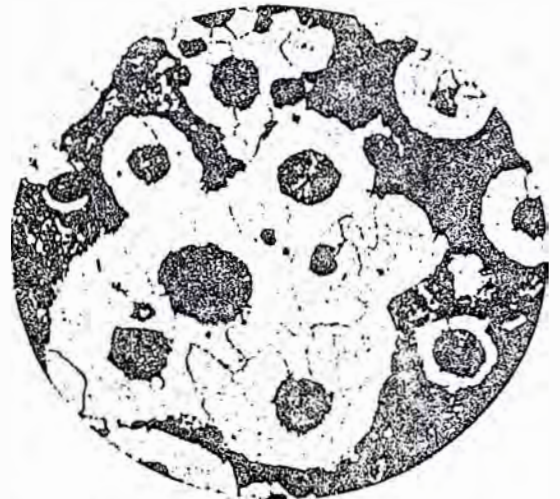


FIGURA 3.36.- Colada 2, 0.06 %P.

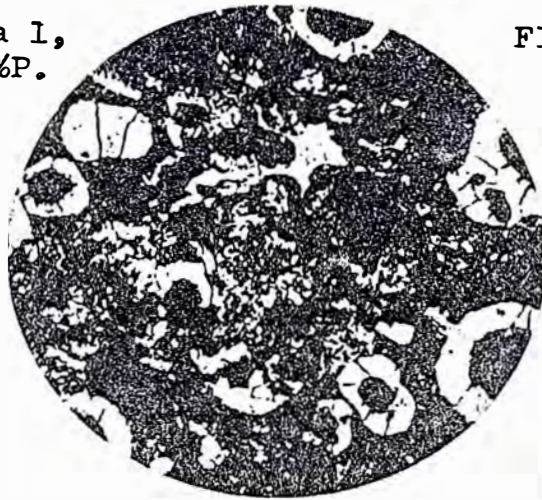


FIGURA 3.37.- Colada 3, 0.225 %P.

Las muestras han sido atacadas con Nital al 2% y están a 100 X.

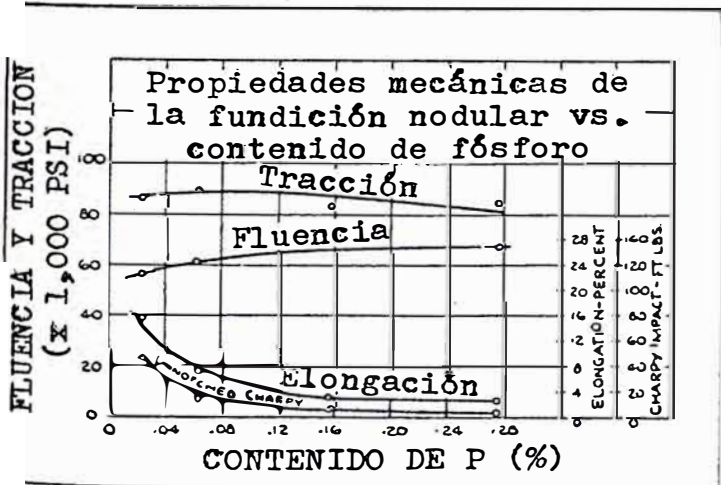


FIGURA 3.38.- Influencia del P sobre las propiedades mecánicas. En bruto de colada.

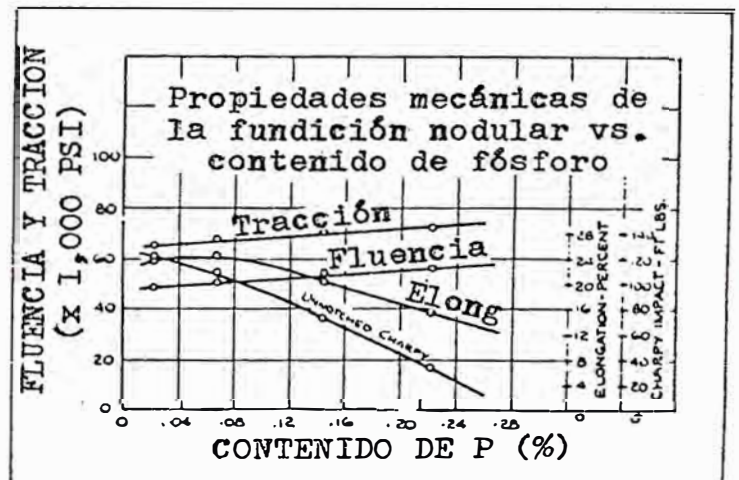


FIGURA 3.39.- Influencia del P sobre las propiedades mecánicas. Recocida a 954 °C.

Cuando el contenido de Mn excede a 0.70%, se encontrarán carburos intercelulares. El Mn es casi 5 veces más potente en la formación de la perlita que el Ni, como se muestra en la Figura 3.40.

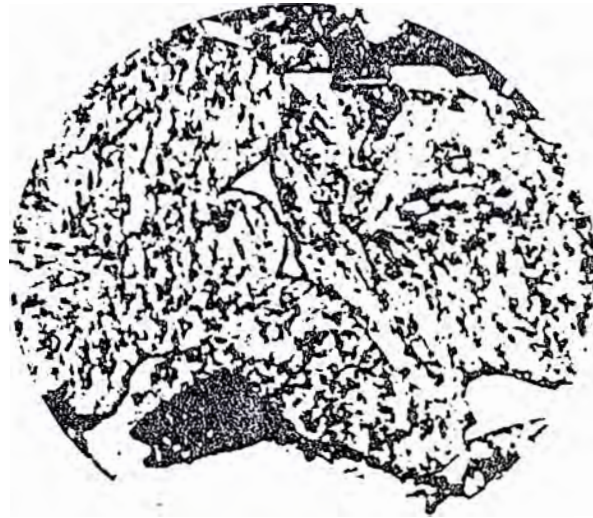


FIGURA 3.40.- Fotomicrografía de una fundición nodular, a 2,000 X, atacada con Nital, con 1.02 %Mn. Presenta carburos intercelulares.

Incrementando el contenido de Mn se obtienen mayores resistencias a la tracción y límites de fluencia, en la condición de bruto de colada y en un grado muy modesto cuando son recocidos. El efecto de incrementar el contenido de Mn a diferentes niveles de Si, se presenta en las Tablas 3.4 y 3.5

El Mn proporciona un método poco costoso para incrementar la templeabilidad en la fundición nodular normalizada. El Mn a 1.0% con 1.0 %Ni, permite a una sección de 7" de espesor, ser normalizada para obtener una dureza de 300 BHN. Sin embargo, con esta combinación se observará una red de carburos finos en los límites intercelulares, como se ilustra en la Figura 3.40, sufriendo la elongación. También el Mn tiene una influencia definitiva sobre el tiempo y temperatura del recocido de ferritización.

Referido a la Tabla 3.2, la Figura 3.41 es la colada 2 con 0.01 %Mn y la Figura 3.42 es la colada 6 con 0.18 %Mn, el resto de la composición es la misma. La estructura recocida de las Figuras 3.41 y 3.42 es ferrítica. El Mn tiene poco efecto sobre las propiedades mecánicas de una estructura recocida.

TABLA 3.4.- EFECTO DEL MANGANESO SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS

	Coladas					
	1	2	3	4	5	6
Carbono total	3.44%	3.65%	3.48%	3.50%	3.50%	3.50%
Silicio	1.90	1.87	1.98	2.50	2.50	2.50
Manganeso	0.01	0.18	0.38	0.27	0.76	1.28
Níquel	0.01	0.01	0.04	1.03	1.03	1.03
Cromo	0.025	0.022	0.021	-	-	-
Magnesio	0.059	0.033	0.044	0.053	0.053	0.053
Cobre	0.01	0.01	0.01	-	-	-
Fósforo	0.028	0.030	0.033	0.034	0.034	0.034
Azufre	0.017	0.015	0.011	0.012	0.012	0.012
Cerio	-	-	-	-	-	-
Carbono equivalente	4.01	4.21	4.07	4.25	4.25	4.25
Bruto de colada						
%Ferrita	95	60	20	-	-	-
%Perlita	5	40	80	-	-	-
Resist. a la tracción, Kg/mm <sup>2</sup>	45.14	52.31	63.28	66.69	74.74	75.79
Límite de fluencia, Kg/mm <sup>2</sup>	29.11	35.44	37.26	41.41	46.88	54.28
Elongación, %	22.6	12.1	13.3	10.5	5.0	2.0
BHN	152	163	197	196	241	286
Recocido						
Resist. a la tracción, Kg/mm <sup>2</sup>	37.44	39.02	41.41	-	-	-
Límite de fluencia, Kg/mm <sup>2</sup>	26.58	25.52	28.76	-	-	-
Elongación, %	25.9	25.4	26.1	-	-	-
BHN	121	128	138	-	-	-

TABLA 3.5.- EFECTO DEL MANGANESO SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS

	Coladas				
	1	2	3	4	5
Carbono total	3.34%	3.34%	3.34%	3.34%	3.48%
Silicio	2.13	2.07	2.11	2.15	2.18
Manganeso	0.02	0.12	0.25	0.44	0.72
Azufre	0.012	0.011	0.010	0.011	0.010
Fósforo	0.029	0.029	0.029	0.029	0.021
Níquel	0.70	0.60	0.65	0.66	0.84
Magnesio	0.048	0.049	0.045	0.044	0.052
Carbono equivalente	3.98	3.96	3.97	3.99	4.13
Bruto de colada					
Resist. a la tracción, Kg/mm <sup>2</sup>	44.08	45.84	51.04	52.38	59.69
Elongación, %	18.0	15.0	13.0	5.0	2.0
BHN	164	166	173	199	235
Microestructura	Nodular	Nodular	Nodular	Nodular	Nodular
%Ferrita	90	90	85	40	25
%Perlita	10	10	15	60	75

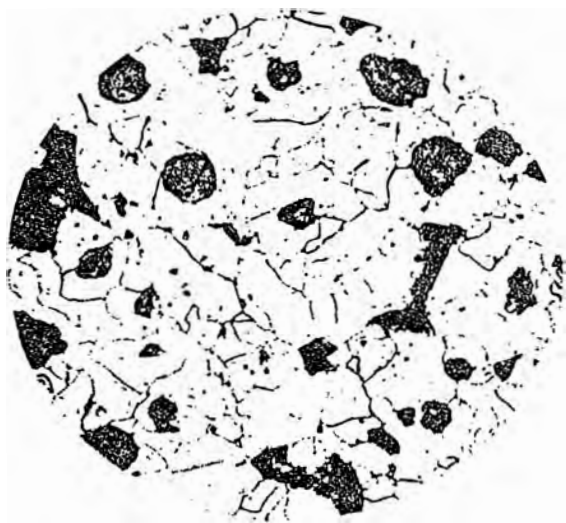


FIGURA 3.41.- En bruto de colada, atacada, a 150 X.



FIGURA 3.42.- En bruto de colada, atacada, a 150 X.

### 3.6. INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS NODULIZANTES

a) MAGNESIO.- Los niveles de Mg que producen completamente grafito esferoidal son de 0.020% a 0.060%, dependiendo del contenido de S del hierro base.

El proceso con Mg es muy catalogado, es relativamente barato y puede controlarse. Todos los elementos nodulizantes parecen tener una solubilidad limitada en el baño. Los métodos para adicionar el Mg se evalúan en profundidad al tratar el Capítulo VII. El Mg es universalmente empleado para precipitar el grafito como esferoides, aún cuando pequeñas cantidades de cerio, lantano, itrio, calcio, litio, bario, torio, estroncio, sodio, etc., pueden también intensificar esta propensión.

Este elemento desoxida efectivamente al hierro base. Por ejemplo, un hierro no tratado con un contenido de oxígeno de 0.0135%, cuando se trató con Mg, presentó una reducción en el contenido de oxígeno a un nivel de 0.003%. La efectiva desoxidación es una parte esencial del proceso de fabricación de los fierros fundidos con grafito esferoidal. El contenido de óxidos en los fierros base usados en la producción de fundición nodular, es uno de los factores que influyen en la recuperación del Mg. El óxido de Mg es de color blanco y es re-

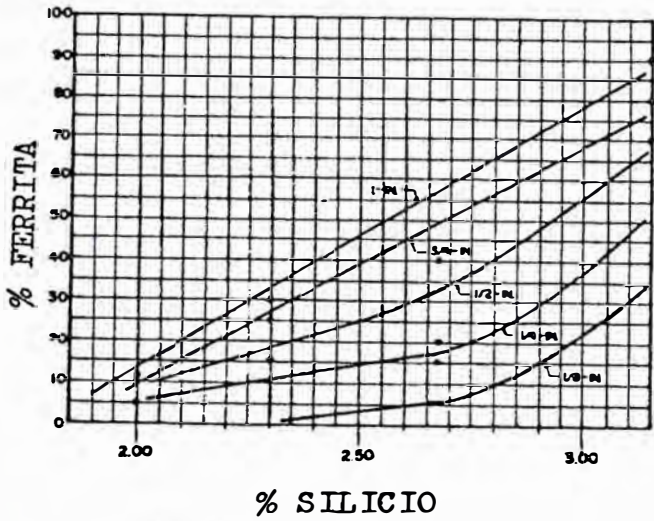


FIGURA 3.43.- % ferrita vs. tamaño de sección, de fundiciones nodulares con alto Mn (0.49 a 0.57 %).

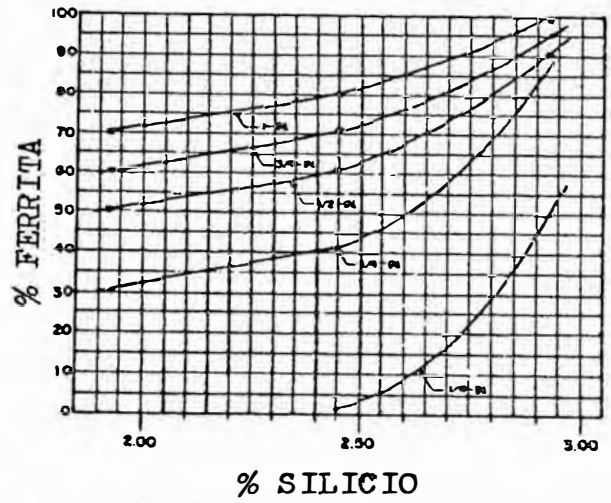


FIGURA 3.44.- % ferrita vs. tamaño de sección, de fundiciones nodulares con bajo Mn (0.08 a 0.09 %).



FIGURA 3.45.- Atacada con Nital al 2%, a 250 X.



FIGURA 3.46.- Atacada con Nital al 2%, a 1,000 X.

Fundiciones nodulares con 1.18 %Mn, recocidas a 927 °C por 4 horas. Notar que los carburos no se han descompuesto.

lativamente estable. Este tiene un bajo grado de solubilidad en el fierro.

Es mucho más liviano que el fierro y flota en la superficie, de donde puede eliminarse. Sin embargo, si está presente en cantidades excesivas promueve la formación de escoria y la flotación del C sobre el lado superior (en el molde) de las piezas.

El Mg se combina con el S para formar el sulfuro de Mg. Una lb de Mg eliminará 1 - 1/3 lbs de S. La función de reducir el S al rango de 0.015% y por debajo de este valor, es obligatorio y esencial al proceso. El sulfuro de Mg resultante, tiene una solubilidad relativamente baja y flota en la superficie del baño, de donde este puede ser eliminado. Si se deja que el sulfuro de Mg permanezca sobre el baño, el S revertirá dentro del fierro tratado causando la rápida pérdida en la nodularidad.

La función del Mg puede anularse por algunos de los elementos con los que forma compuestos. Estos reducen la cantidad disponible muy pequeña para efectuar la esferoidización del grafito. Otros promueven el grafito laminar y destruyen la función nodulizante. Estos elementos nocivos se revisarán posteriormente en este capítulo.

El Mg es un estabilizador de carburos muy potente. Esta función puede también ser una de sus contribuciones esenciales al proceso. Afortunadamente, los carburos pueden desaparecer por composición, por inoculación y por un tratamiento térmico. Se ha determinado que el alto Mg residual es la principal causa del problema de la inversión del chill de la línea central. La influencia del Mg como estabilizador de carburos es reforzada por la presencia de cerio y calcio.

El contenido de Mg disminuye con el incremento de la temperatura y la duración del tiempo de permanencia. Las cantidades añadidas deben ser fortalecidas bajo condiciones adversas. Debe retenerse suficiente Mg para mantener la calidad de los esferoides en el último metal vaciado.

El contenido de S base del baño previo al tratamiento, aparentemente influye en la cantidad de Mg requerido. Esto puede ser el resultado de alguna retención de sulfuros u óxidos en el fierro, que pueden influir el análisis. El Mg puede no estar presente únicamente en su forma efectiva.

Se pueden obtener excelentes esferoides con tan poco como 0.018% de Mg residual. Generalmente, la cantidad requerida en el hierro tratado incrementa con el contenido de S base y en cierto grado sobre la magnitud de la oxidación del baño. Un adecuado balance de pureza, composición controlada de los elementos comunes con el Mg, producirán el esferoide ideal. Algunas de las pérdidas de nodulización, se ilustran en las Figuras 3.47, 3.48 y 3.49, y debajo de ellas el efecto del bajo-tratamiento.



FIGURA 3.47

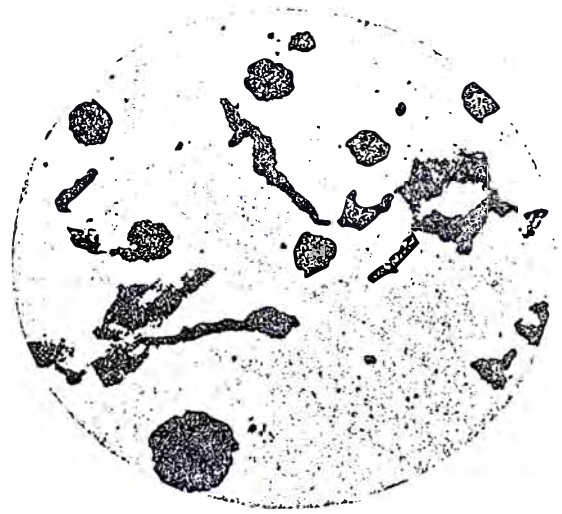


FIGURA 3.48



FIGURA 3.49

El efecto del bajo-tratamiento progresivo con el Mg. La microfotogra



fña de la Figura 3.47, es la primera descomposición de una colada conteniendo 0.03 %Mg, la Figura 3.48 corresponde a la segunda descomposición con 0.025 %Mg y la Figura 3.49 con 0.016 %Mg. El porcentaje de cuasi-láminas incrementa de casi el 20% a aproximadamente 80% con un drástico bajo-tratamiento y/o pérdida.

b) CERIO Y TIERRAS RARAS.- El Ce fue el elemento original usado para producir la formación de los nódulos de grafito o esferoides en fierros fundidos hipereutéticos. El trabajo original fue realizado por H. Morrogh de la Asociación Británica de Investigación del Fierro Fundido (B.C.I. R.A.) en 1,947. También se usó para este propósito el "mischmetal", que es una combinación de Ce y otros elementos de las tierras raras, como se muestra en la Tabla 3.6.

TABLA 3.6.- ANALISIS TIPICO DEL MISCHMETAL

<u>Elementos</u>	<u>%</u>
Cerio	44.9
Lantano	24.5
Praseodimio	6.0
Neodimio	19.5
Samario	2.1
Ytrio y otras tierras raras	0.5

Los resultados de una investigación para determinar cual de los principales elementos de las tierras raras en el mischmetal es más efectivo en promover la formación de grafito nodular o esferoidal en el fierro fundido, es como sigue:

Cerio.- Una cantidad de 0.035 %Ce en un fierro fundido hipereutético producirá fundición nodular. El Ce es un estabilizador de carburos muy potente. Los fierros tratados con Ce deben tener un contenido de C en exceso de 3.80% y deben tener una inoculación con FeSi muy considerable. También, se encontró que cuando el Ce está presente en cantidades tan bajas como 0.02% en un fierro que se desulfuró con Mg, y conteniendo de 0.015% a 0.020 %Mg, puede producirse un fierro fundido completamente de grafito nodular.

Los sulfuros de Ce son más estables que los sulfuros de Mg y la reacción no es reversible en presencia de FeO. La velocidad de reacción del Fe y

Ce es considerablemente más lenta que el Mg y no implica "pirotecnia". Sin embargo, es mayor el grado de reactividad.

Lantano.- No fue posible producir un hierro con un alto porcentaje de grafito nodular, aún cuando estaba presente 0.05% de lantano. Solamente un hierro conteniendo grafito vermicular y nódulos irregulares, pudo obtenerse. Se encontró que el lantano es un estabilizador de carburos mucho menor que el Ce. Cuando se usa el lantano en combinación con el magnesio ferrosilicio, puede producirse una fundición nodular ferrítica con una cantidad de nódulos en el rango de 800 nódulos por mm. Las fundiciones nodulares con lantano tienen un mayor nivel de ductilidad y resistencia al impacto que las fundiciones nodulares producidas solamente con Mg o Mg y Ce.

Neodimio.- No se puede producir ningún grafito esferoidal con adiciones de hasta 0.10% de neodimio, sobre un hierro base de bajo S. Sólo se produjeron grafito vermicular y carburos, cuando se ensayó este elemento. Parece ser que el neodimio es un extremadamente potente estabilizador de carburos.

Praseodimio.- Cuando está presente el praseodimio en cantidades de 0.030% a 0.050%, en los fierros fundidos, se producen grafito vermicular y unos pocos nódulos. El hierro tiende a ser carbúrico y una adición de 0.60% Si no produce una matriz libre de carburos.

Ytrio.- El elemento ytrio de las tierras raras, puede usarse para producir grafito esferoidal en fierros base con bajo S. Las cantidades usadas varían en el rango de 0.10% a 0.020% de ytrio. Las reacciones en el tratamiento, son relativamente moderadas sin la pirotecnia experimentada cuando se usan materiales magnésiferos. Desafortunadamente, el costo del ytrio es tal que no es económicamente práctico producir piezas comerciales a partir de fierros tratados con este elemento. Si en el futuro el ytrio se vuelve fácilmente disponible a un precio que puede hacer su uso comercialmente posible como un material de tratamiento para la fundición nodular, se usará ampliamente este metal de las tierras raras.

En el pasado, la información presentada aquí fue solamente académica, debido a que no había un medio comercial práctico de separación de los elementos individualmente. Sin embargo, hoy en día gracias a la necesidad del europio en los tubos de la televisión a colores, se ha vuelto una realidad prácti-

ca, la separación comercialmente de los principales elementos de las tierras raras, de sus minerales. El C.S.F.-10, una aleación de Si y tierras raras, se produce a partir de óxidos de tierras raras conteniendo aproximadamente 90.0 %Ce. Definitivamente, se ha establecido que el Ce es el más efectivo de los elementos de las tierras raras, para promover la formación de grafito esferoidal, la efectividad de los otros elementos de las tierras raras sigue siendo cuestionable

Una de las principales ventajas de usar el Ce y los otros metales de las tierras raras, en la producción de fundición nodular, es el alto punto de vaporización de estos elementos. Por ejemplo, el Ce tiene un punto de vaporización de 2,406 °C comparado a 1,099 °C para el Mg. El comparativamente alto punto de ebullición del Ce y los otros elementos de las tierras raras, junto con la habilidad para formar sulfuros y óxidos estables, minimizan la pérdida. Por lo tanto, cuando se usan el Ce o tierras raras en combinación con el Mg, las fundiciones nodulares que se producen pueden mantenerse por períodos largos sin el deterioro de los nódulos, un acontecimiento común en los fierros tratados con Mg.

En la producción de piezas de fundición nodular, la formación de escoria y el agrietamiento en o casi por debajo de la superficie de la pieza, siempre ha sido una causa seria de defectos en piezas que soportan altos esfuerzos y en válvulas hidráulicas. El problema inicial de la escoria se origina por la formación de silicatos, óxidos y sulfuros de Mg, resultantes del tratamiento con Mg. Si tanto como 50% de la adición de Mg se reemplaza con Ce, la formación de escoria (dross) puede reducirse significativamente o eliminarse en piezas críticas de fundición nodular. Cuando se usan tierras raras altas en lantano, en combinación con una adición relativamente baja en Mg, puede producirse en piezas de secciones delgadas una fundición nodular blanda en bruto de colada.

Una de las ventajas más importantes de usar Ce en la fundición nodular es su muy conocida habilidad para controlar la influencia de elementos subversivos, tales como Ti, Pb, Sb y As. La presencia de 0.015% a 0.020 %Ce supera completamente el problema de los elementos subversivos.

c) CALCIO.- La solubilidad del Ca en la fundición nodular es relativamente ba-

ja. Se han producido fierros conteniendo hasta 50% de grafito esferoidal, añadiéndole 0.65 %Ca a un hierro base con bajo S. Aleaciones experimentales de base Si, conteniendo cantidades iguales de Mg, Ca y tierras raras, producen fundición nodular.

<u>Elementos</u>	<u>%</u>
Magnesio	20.0
Calcio	20.0
Tierras Raras	20.0
Silicio	36.0
Fierro	Resto

Esta aleación nunca fue producida comercialmente, aún cuando se obtuvieron recuperaciones del Mg en el rango de 85% y la violencia de la reacción del tratamiento fue mínima. Desafortunadamente, esta aleación reacciona con el refractario de la cuchara de tratamiento y se requiere precauciones especiales que no son prácticas normales en la producción comercial de la fundición nodular.

En la actualidad, el nivel nominal de Ca necesario para suprimir la violencia de la reacción del tratamiento del hierro con el Mg, en las aleaciones comerciales de ferrosilicio magnesio producidos en los E.E.U.U. y Japón es 0.80% a 1.50% de Mg en aleaciones de FeSi conteniendo altos niveles de Ca, reaccionan menos violentamente y proporcionan un aumento en la recuperación del Mg.

Aumentando las adiciones de Ca en exceso de 0.03%, actúa en combinación con el Mg para intensificar la influencia del Mg en la estabilización de carburos. Por debajo de este nivel, el Ca tiende a incrementar la cantidad de nódulos, de este modo aumenta la efectividad de los inoculantes cuando se usan cantidades controladas. No está claramente definido el mecanismo por el cual este elemento aumenta la cantidad de nódulos. Sin embargo, parece estar relacionado a la influencia en la nucleación heterogénea de los siliciuros alcalinos raros, carburos y sulfuros en las fundiciones grises y nodulares. Se usan las adiciones controladas de Ca en el pretratamiento del hierro nodular base, para mejorar la recuperación total del Mg en la producción de fundición nodular y minimizar el deterioro o pérdida de los nódulos.

Esto es particularmente cierto en el hierro base fundido en cubilote ácido o de escoria neutral.

d) BARIO.- Puede añadirse a las aleaciones ferrosilicio magnesio, cantidades de Ba de 2.00% a 2.50%, para promover una alta cantidad de nódulos en la fundición nodular. Además, este elemento minimiza la formación de carburos en la línea central en piezas de secciones delgadas.

El Ba se está añadiendo en cantidades próximas al 6.0% a un grupo de aleaciones ferrosilicio magnesio, que son producidas en Francia. Se ha reportado que estas aleaciones pueden usarse para tratar al hierro base sin la necesidad de la post-inoculación con FeSi u otros inoculantes.

e) OTROS ELEMENTOS ESFEROIDIZANTES.- Hay ciertos elementos, aparte de aquellos que se han discutido, los cuales también promueven la formación de grafito esferoidal en los fierros fundidos. En el grupo de los metales alcalinos litio, sodio, estroncio y berilio, son efectivos en grados variables, probablemente debido a su estrecha afinidad por el oxígeno. Se ha reportado que los metales reactivos pesados tales como torio y uranio, producen esferoides de grafito cuando se añaden a los fierros fundidos. Esto puede estar relacionado a la alta reactividad de estos metales y su habilidad para formar óxidos y sulfuros muy estables.

Usualmente, el Ni se añade con el Mg como la aleación soporte. La mayoría de los datos publicados anteriormente por consiguiente reflejan significativos porcentajes de Ni, como Incomag N° 1 (aleación Ni-Mg, N° 1), y posteriormente Incomag N° 2 (aleación Ni-Mg-Si, N° 2), que fueron las aleaciones originales de tratamiento.

### 3.7. INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS ALEANTES

a) NIQUEL.- La influencia del contenido de Ni en estos tipos de fundición nodular, es como sigue:

- Ferrítica (bruto de colada), la adición depende del tamaño de la sección.
- Perlítica o acicular, hasta 4%.
- En grados austeníticos, de 18% a 36% como se especifica en los grados.

El Ni aumenta la resistencia de la ferrita y sirve para reducir los carburos, ya que es un grafitizador con casi 50% de la efectividad del Si. Además, el Ni es un formador de perlita o aumenta la resistencia, por lo tanto no se recomienda donde se requiera una estructura ferrítica en bruto de colada. Una adición de 1 %Ni aumenta la resistencia a la tracción y el límite de fluencia en casi  $3.52 \text{ Kg/mm}^2$ , con sólo una reducción en la elongación de 1 a 2%. Con un contenido de 3 %Ni, puede producirse una resistencia a la tracción de  $84.37 \text{ Kg/mm}^2$  (120,000 PSI) con 3% de elongación. A este nivel, se retarda el recocido de ferritización, sin embargo se mejoran la resistencia y la tenacidad. Datos de coladas conteniendo diversas concentraciones de Ni, se presentan en la Tabla 3.7.

El Ni incrementa marcadamente la ductilidad, cuando la concentración es cercana al rango superior especificado.

La perlita originada por el Ni es menos estable a temperaturas elevadas que la perlita originada por el Mn, de este modo responde más fácilmente al recocido de ferritización. Como en el acero, pueden obtenerse apropiadas estructuras de la matriz, ya sea perlítica, acicular, martensítica y austenítica, con el Ni y otros aleantes por adecuados tratamientos térmicos.

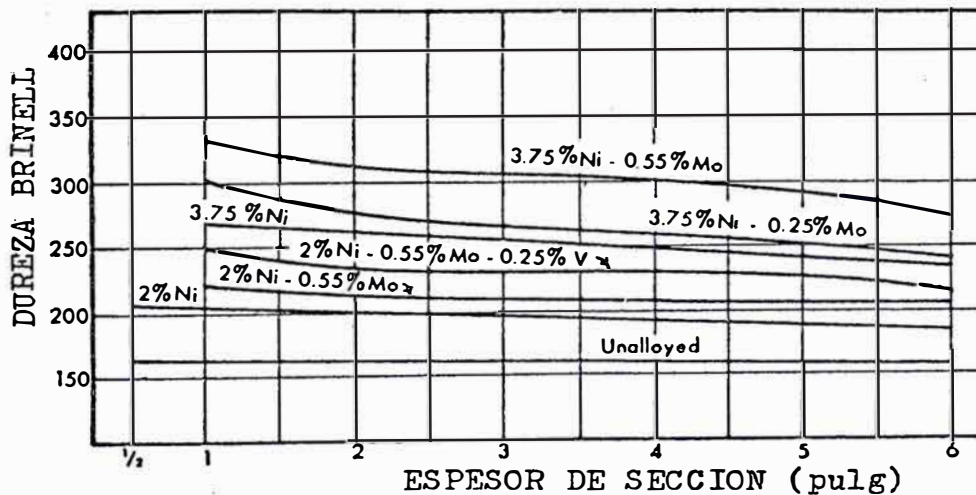


FIGURA 3.50.- Efecto de los aleantes y espesor de sección, sobre la dureza de la fundición nodular en bruto de colada.

Los datos de las fundiciones nodulares aleadas en las Figuras 3.50 y

3.51, son del artículo de C.R. Isleib y R.E. Savage publicado en Transactions (A.F.S.), Volumen 65 (1,957). Estas figuras ilustran efectivamente las propiedades obtenidas con aleantes y diversos tratamientos térmicos.

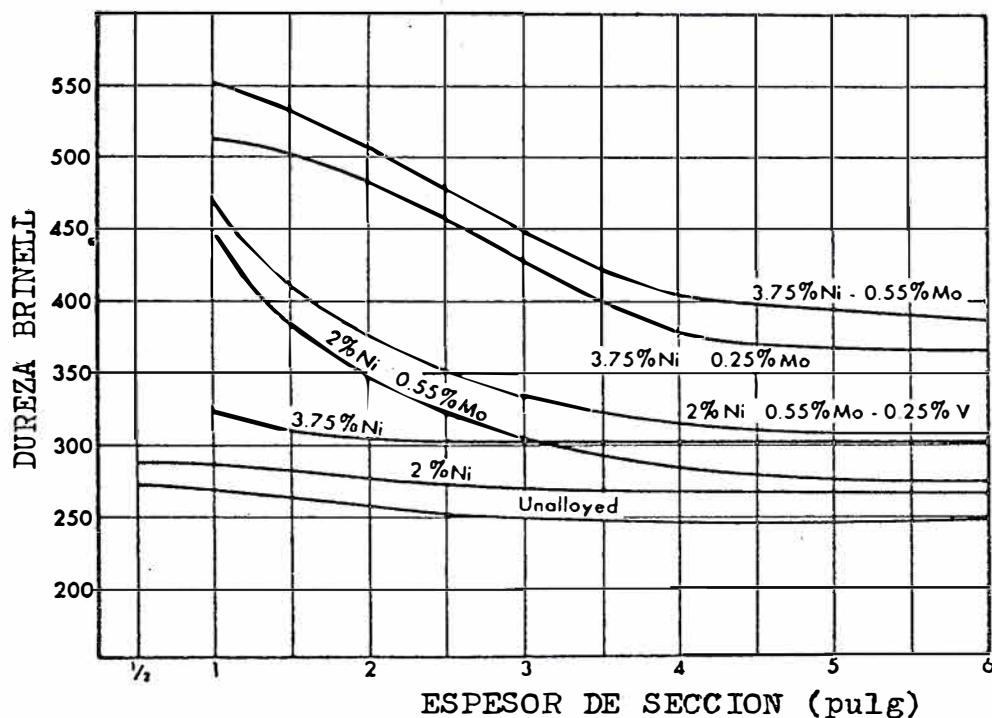


FIGURA 3.51.- Efecto de los aleantes sobre la dureza de piezas de fundición nodular normalizadas, en secciones de hasta 6" de espesor.

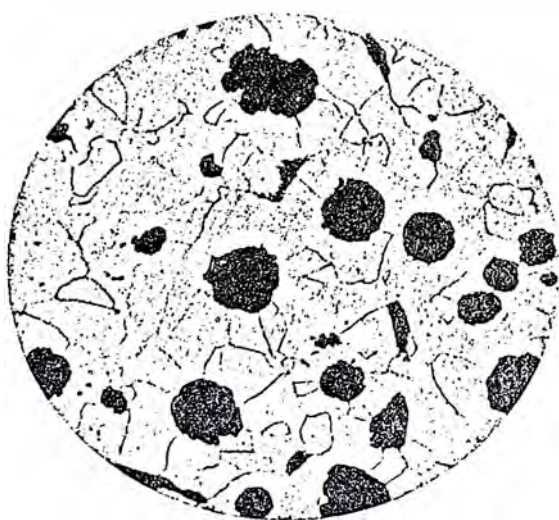


FIGURA 3.52.- Colada 1, sin Ni, a 100X.

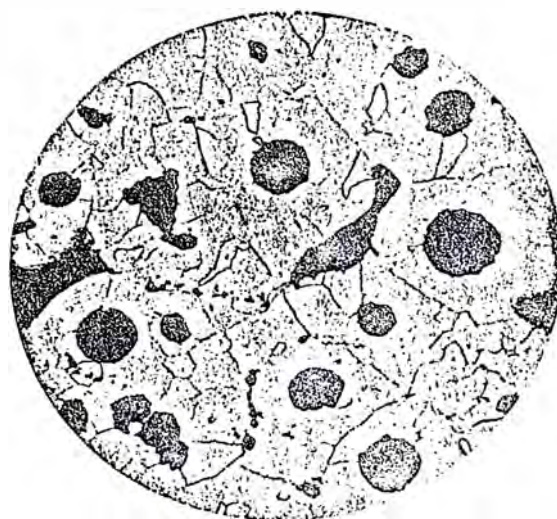


FIGURA 3.53.- Colada 2, con 0.63 %Ni, 100X.

En las Figuras 3.52 y 3.53, se presentan microestructuras de la colada 1 sin Ni y colada 2 con 0.63 %Ni, atacadas con Nital al 4%, las cuales se presentan en la Tabla 3.7. Observar la diferencia en el contenido de Si que puede explicar la baja resistencia del fierro con Ni. La colada 2 tiene algo de perlita mientras que la colada 1, sin Ni, es sustancialmente ferrítica.

TABLA 3.7.- EFECTO DEL NIQUEL SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS

	Coladas						
	1	2	3	4	5	6	7
Carbono total	3.55%	3.62%	3.70%	3.68%	3.37%	3.37%	3.37%
Silicio	2.46	2.01	2.45	2.37	2.40	2.40	2.40
Manganeso	0.01	0.01	0.22	0.44	0.24	0.24	0.24
Níquel	0.08	0.63	0.64	1.70	1.00	2.34	3.25
Cromo	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Magnesio	0.062	0.062	0.06	0.055	0.096	0.096	0.096
Cobre	0.08	0.03	-	0.05	0.08	0.08	0.08
Fósforo	0.020	0.018	0.029	0.034	0.038	0.038	0.038
Azufre	0.006	0.006	0.006	0.007	0.011	0.011	0.011
Cerio	0.003	0.003	-	-	-	-	-
Carbono equivalente	4.29	4.22	4.30	4.39	4.09	4.09	4.09
	Bruto de colada			Bloque en "Y" de 1"			
%Ferrita	98	95	90	70	80	-	-
%Perlita	2	5	10	30	20	-	-
R. a la t. (Kg/mm <sup>2</sup> )	44.79	42.89	48.09	70.87	65.81	67.50	83.53
Lím. de f. (Kg/mm <sup>2</sup> )	29.32	26.01	32.55	44.79	41.76	45.84	61.45
Elongación, %	27.5	27.0	20.0	10.0	10.0	8.5	6.5
BHN	141	140	170	241	207	228	269
	Recocido		B. de C., bloque en "Y" de 4"				
R. a la t. (Kg/mm <sup>2</sup> )	43.87	41.66				58.92	71.29
Lím. de f. (Kg/mm <sup>2</sup> )	29.39	26.51				43.17	61.10
Elongación, %	29.0	28.5				4.0	1.0
BHN	143	132				228	286

b) MOLIBDENO.- Se emplea 0.03 %Mo como máximo, para inhibir los carburos intercelulares. En las especificaciones, generalmente con Ni para la templabilidad. El Mo, usualmente presente con Ni, aumenta la templabilidad, promueve la estructura acicular (la Figura 3.57 para alta resistencia, tenacidad, resistencia a la fluencia serpeante y a la fatiga). Comúnmente, el Mo se emplea para incrementar la resistencia y dureza en piezas de secciones gruesas.

El Mo, por lo general se añade como la aleación ferromolibdeno (62 %Mo), preferentemente después del tratamiento con Mg para minimizar los carburos. El Mo retarda el recocido y es un formador de perlita en la fundición no-



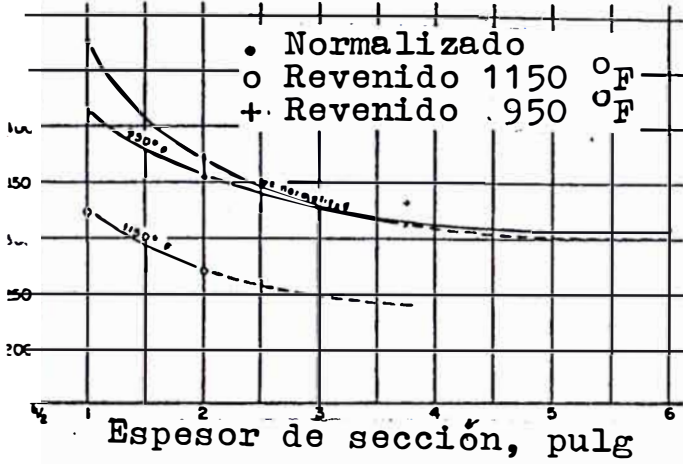


FIGURA 3.54.- Efecto de revenir o normalizar 1 hr, una fundición nodular de 2 %Ni, 0.55 %Mo y 0.25 %V, en diferentes secciones.

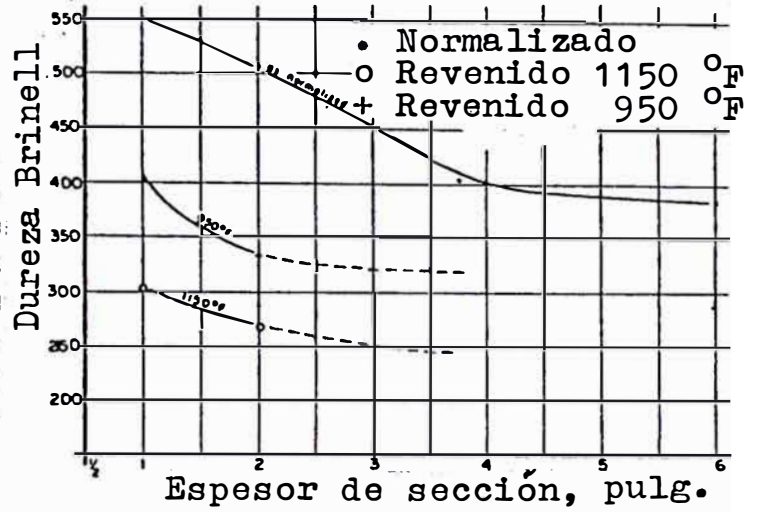


FIGURA 3.55.- Efecto de revenir o normalizar 1 hr, una fundición nodular de 3.75 %Ni, 0.55 %Mo, en diferentes secciones.

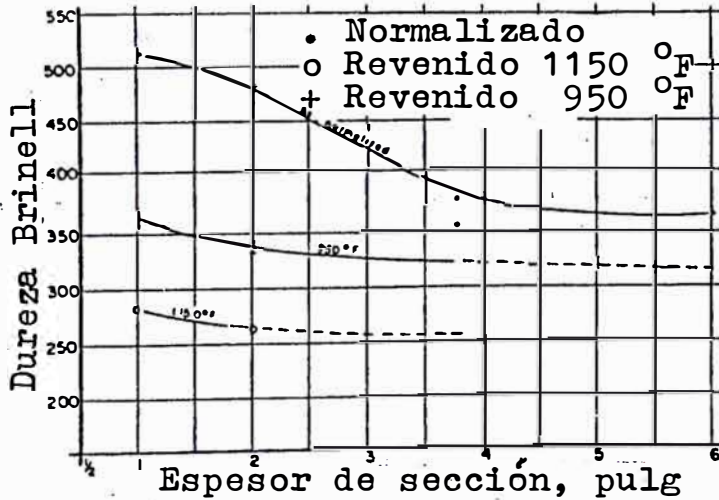


FIGURA 3.56.- Efecto de revenir o normalizar 1 hr, una fundición nodular de 3.75 %Ni, 0.25 %Mo, en diferentes secciones.

dular en bruto de colada.

La resistencia a la tracción se incrementa en casi  $3.52 \text{ Kg/mm}^2$  por cada 1 %Mo en el grado ferrítico, mientras que la elongación disminuye en casi 8%. El Mo responde bien al tratamiento térmico y se añade principalmente para la templabilidad. Este efecto se ilustra en las precedentes Figuras 3.50, 3.51, 3.54, 3.55 y 3.56. El efecto del Mo sobre las propiedades mecánicas de la fundición nodular, también se muestra en la Tabla 3.8.

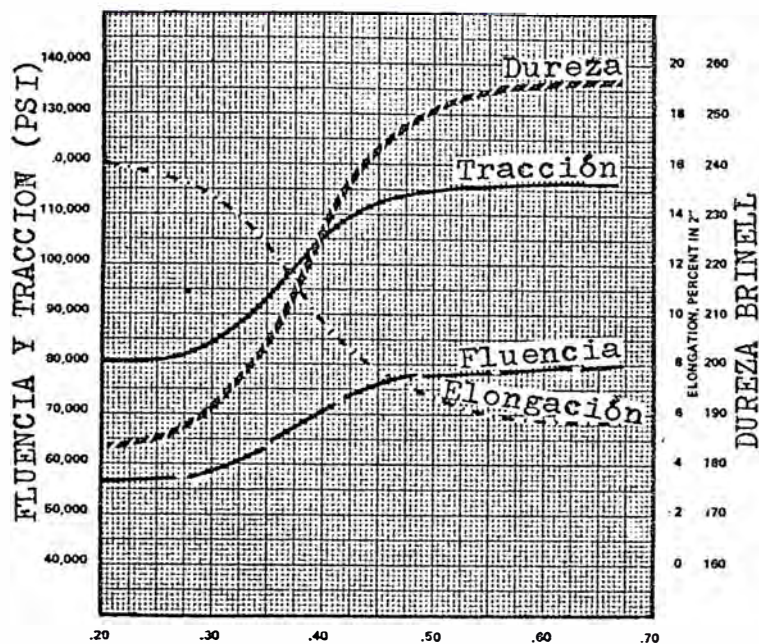
TABLA 3.8.- EFECTO DEL NIQUEL Y MOLIBDENO SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS EN BRUTO DE COLADA

	Coladas				
	1	2	3	4	5
Carbono total	3.59%	3.59%	3.59%	3.69%	3.50%
Silicio	2.69	2.69	2.69	2.44	2.49
Fósforo	0.036	0.036	0.036	0.037	0.035
Azufre	0.011	0.011	0.011	0.008	0.009
Manganeso	0.26	0.26	0.26	0.42	-
Magnesio	0.088	0.088	0.088	0.054	0.060
Níquel	1.11	1.11	1.11	1.97	4.02
Molibdeno	-	0.64	0.90	0.51	0.55
	Bruto de colada, bloque en "y" de 1"				
R. a la t. ( $\text{Kg/mm}^2$ )	63.91	71.26	72.66	66.86	95.55
Lím. de f. ( $\text{Kg/mm}^2$ )	42.11	49.50	53.72	46.68	57.86
Elongación, %	9.0	5.5	3.0	6.0	4.0
BHN	207	228	269	235	363
	Bruto de colada, bloque en "y" de 4"			Estructura	
R. a la t. ( $\text{Kg/mm}^2$ )		58.99	60.39	50% Ferrita	
Lím. de f. ( $\text{Kg/mm}^2$ )		42.47	47.04	30% Perlita	100% Acicular
Elongación, %		8.5	3.0	20% Acicular	
BHN		228	269		

c) COBRE.- La influencia del contenido de Cu en la fundición nodular, es como sigue:

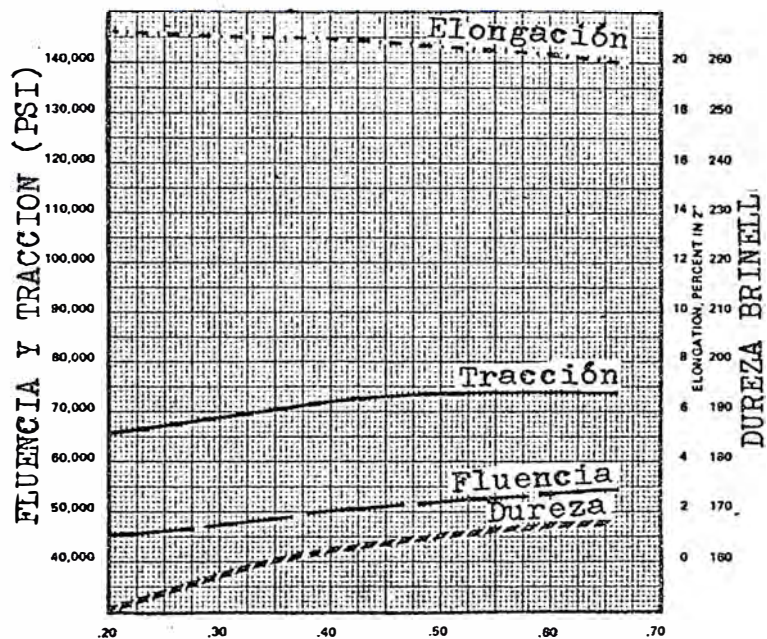
- En la fundición nodular ferrítica en bruto de colada, 0.03 %Cu máximo o menos.
- De 0.30% a 0.50% en las fundiciones nodulares perlíticas.
- Como un reemplazo parcial del Ni, en fundiciones nodulares aciculares y austeníticas.

El Cu ha tenido una historia bastante singular en el breve lapso de la producción de fundición nodular. Al comienzo, el Cu encontró algún uso como



CONTENIDO DE COBRE (%)

FIGURA 3.57.- Propiedades mecánicas de la fundición nodular en bruto de colada.



CONTENIDO DE COBRE (%)

FIGURA 3.58.- Propiedades mecánicas de la fundición nodular recocida.



FIGURA 3.59.- Fundición nodular de Cu 0.11%; Si 2.48%; C total 3.51%. Ataca da con Nital al 2%, a 150 X.

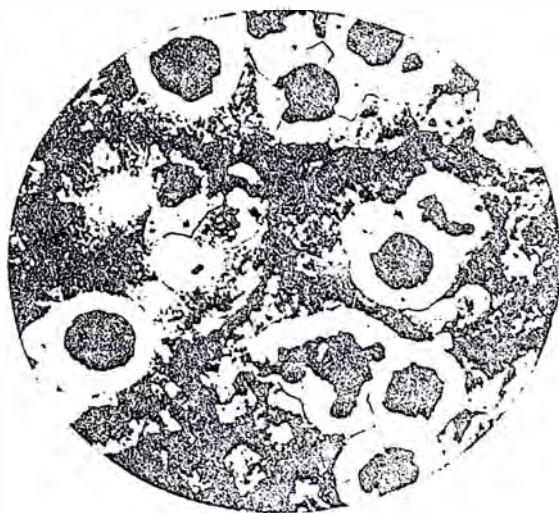


FIGURA 3.60.- Fundición nodular de Cu 0.48%; Si 2.42%; C total 3.51%. Ataca da con Nital al 2%, a 150 X.

la aleación soporte para el Mg, en las aleaciones de tratamiento. A medida que se iba avanzando, el potente grado con que este metal forma perlita retardó su uso, excepto en la producción de fundición nodular perlítica para cigueñales.

El Cu disminuye la ferrita y es casi el doble de potente estabilizador de la perlita que el Mn. El Cu retarda el recocido, particularmente a bajos contenidos de Si. El Cu disminuye la resistencia al impacto y eleva la temperatura de transición. Otra restricción en el uso del Cu, es el aumento asociado con porcentajes de tratamiento considerables requeridos en fierros base con altos contenidos de S. El Cu por encima del 2% no es soluble en el hierro y se precipita en los bordes de grano. Sin embargo, el Cu no parece contribuir a los carburos primarios.

Frecuentemente, se ha observado la incrementada sensibilidad de las fundiciones nodulares con Cu a los elementos subversivos y deben emplearse metales de alta pureza para capitalizar los beneficios impartidos por pequeñas adiciones de este metal. Los precios bajos contribuyen a la falta de confianza en el Cu, debido a que el metal utilizado debe ser de alta pureza y libre de los contaminantes típicos del Cu tales como Pb, As, Te, Sn e H. Aún el Cu electrolítico que es de muy alta pureza, contiene hidrógeno.

A pesar de lo explicado previamente, el Cu incrementa la resistencia y dureza en bruto de colada en casi  $0.70 \text{ Kg/mm}^2$  por cada 0.10% de adición, sin embargo sólo aumenta muy ligeramente cuando está totalmente recocida. El Cu es un excelente soporte del Mg. Las fundiciones nodulares conteniendo Cu, pueden ser endurecidas por precipitación cuando el Cu está presente de 1.00% a 1.50%.

La fundición nodular con contenidos de 1.25% a 1.75 %Cu, puede endurecerse por precipitación, calentando a una temperatura entre  $482 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $566 \text{ }^\circ\text{C}$ . Piezas normalizadas que han sido maquinadas, pueden endurecerse para mejorar la resistencia al desgaste y resistencia a la tracción, sin distorsiones severas.

### 3.8. INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS RESIDUALES

a) TELURO.- El Te hasta 0.020% es empleado por algunos productores de fundición nodular para controlar los "pinholes" (1 a 2 gramos por 100 libras).

El Te es un grafitizador en la fundición nodular y obstaculiza la esferoidización a menos que este presente el Ce. Este elemento propiamente pertenece a la categoría de elementos subversivos. El efecto del Te sobre las propiedades mecánicas se presenta en la Tabla 3.9.

TABLA 3.9.- EFECTO DEL TELURO SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS

	Colada 1	Colada 2
Carbono total	3.62%	3.62%
Silicio	2.48	2.48
Fósforo	0.03	0.03
Azufre	0.011	0.011
Manganeso	0.23	0.23
Níquel	0.65	0.65
Magnesio	0.056	0.056
Cromo	0.05	0.05
Cobre	0.08	0.08
Teluro	-	0.052
Carbono equivalente	4.36	4.36
Bruto de colada, blorue en "y" de 1"		
Resistencia a la tracción, Kg/mm <sup>2</sup>	52.87	49.22
Límite de fluencia, Kg/mm <sup>2</sup>	38.95	33.96
Elongación, %	17.0	13.0
BHN	179	170

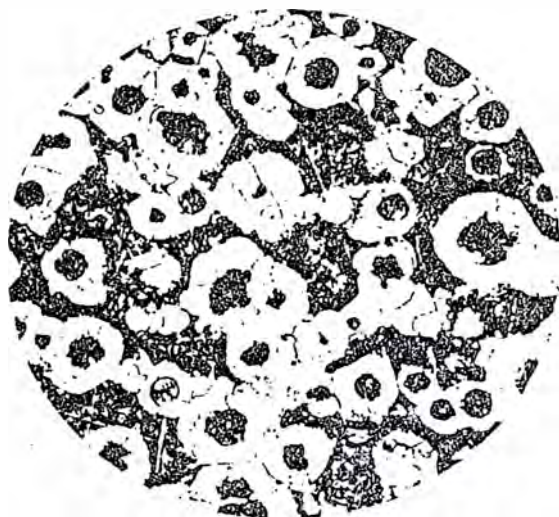


FIGURA 3.63.- Colada 1, atacada con Nital al 2%, a 100 X.

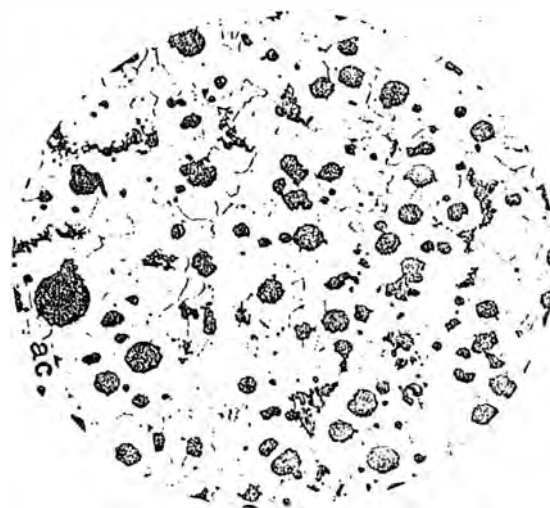


FIGURA 3.64.- Colada 2, atacada con Nital al 2%, a 100 X.

Las Figuras 3.63 y 3.64 ilustran el efecto de adicionar 4 onzas de



FIGURA 3.65.- Sección de 3/8". C total 3.75%; Si 2.63%; Mn 0.39%; S 0.025%; Mg 0.071%; Pb 0.003%; Sb 0.007%.



FIGURA 3.66.- Láminas de grafito debido a la presencia del Pb. C total 3.63%; Si 2.65%; Mn 0.31%; S 0.006%; Mg 0.094%; Pb 0.015%.



FIGURA 3.67.- Sección de 1". Resistencia a la tracción = 46.90 Kg/mm<sup>2</sup>; Límite de fluencia = 30.94 Kg/mm<sup>2</sup>; Elongación = 5.0%

Te a 50 libras de fierro. No hay aparente deformación de los esferoides, y la perlita desaparece. Observar en la Tabla 3.9, la reducción en la elongación que es inconsistente con el cambio de la matriz. El Ce estaba presente en la aleación de tratamiento.

b) PLOMO.- Tan poco como 0.002 %Pb, contaminado por la carga, fluorita o ferrosulfuros, contrarresta la influencia de esferoidización del Mg, originándose grafito laminar. El Pb es uno de los más potentes de este grupo subversivo y su concentración debe mantenerse bajo control. Las adiciones de Ce refuerzan al Mg para aumentar el nivel de tolerancia. El efecto del Pb sobre la estructura y las propiedades mecánicas, se presenta en la Tabla 3.10.

TABLA 3.10.- EFECTO DEL PLOMO SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS

	Coladas			
	1	2	3	4
Carbono total	3.44%	3.44%	3.44%	3.33%
Silicio	1.96	2.04	1.98	2.09
Manganeso	0.02	0.02	0.02	0.02
Azufre	0.018	0.014	0.013	0.014
Fósforo	0.026	0.026	0.026	0.026
Níquel	0.74	0.72	0.81	0.81
Magnesio	0.084	0.059	0.054	0.061
Cerio	-	-	-	0.021
Plomo	0.004	0.009	0.013	0.014
Carbono equivalente	3.98	4.03	4.03	3.96
	Bruto de colada, bloque en "Y" de 1"			
R. a la t., Kg/mm <sup>2</sup>	47.25	43.32	33.36	45.50
Elongación, %	19.0	6.0	Nada	20.0
BHN	169	172	203	152
Estructura	Nodular	Grafito laminar con esferoides	Grafito laminar disperso con esferoides	Grafito laminar con esferoides

Como con la mayoría de los elementos de este grupo, el Pb es más perjudicial en secciones gruesas. Las Figuras 3.65, 3.66 y 3.67 revelan el tremendo efecto nocivo que tiene el Pb sobre la calidad de la fundición nodular producida.

c) TITANIO.- El Ti en cantidades de hasta 0.07%, puede ser tolerado, sin embargo es preferible un máximo de 0.03%. El Ti domina al Mg. Aumentando algunos centésimos de % de estos elementos, originan que el grafito precipite como pequeñas láminas y esferoides de forma irregular, como se muestra en

la Figura 3.67. Los efectos adversos del Ti son más pronunciados en piezas de secciones gruesas.

La influencia subversiva de todos los elementos de este grupo es acumulativa, por ejemplo, la presencia del Pb limita la tolerancia para el Ti, Sb y Bi. La fundición nodular conteniendo Cu es particularmente sensible al Ti. El efecto de las adiciones de Ti sobre las propiedades mecánicas, se presenta en la Tabla 3.11.

TABLA 3.11.- EFECTO DEL TITANIO SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS

	Coladas				
	1	2	3	4	5
Carbono total	3.60%	3.60%	3.68	3.68	3.68%
Silicio	2.06	2.12	2.43	2.43	2.43
Manganeso	0.02	0.02	0.21	0.21	0.21
Azufre	0.012	0.013	0.012	0.012	0.012
Fósforo	0.024	0.024	0.035	0.035	0.035
Níquel	0.76	0.76	0.63	0.63	0.63
Magnesio	0.056	0.068	0.042	0.042	0.042
Titanio	-	0.03	-	0.037	0.047
Carbono equivalente	4.22	4.24	4.41	4.41	4.41
	Bruto de colada, bloque en "Y" de 1"				
R. a la t., Kg/mm <sup>2</sup>	48.37	49.74	56.18	50.41	50.55
Lím. de f., Kg/mm <sup>2</sup>	-	-	36.49	31.64	27.77
Elongación, %	19.0	15.0	14.0	13.5	14.5
BHN	170	178	179	179	179
Estructura	Esencial - mente nodu- lar.	Alguna evi- dencia de láminas.			

d) ALUMINIO.- Puede tolerarse en la fundición nodular cantidades de Al de hasta 0.05%. El Al actúa de una manera similar a la del Ti. En vista de que su influencia nociva no es tan pronunciada como la del Ti, este causa el deterioro de los esferoides de grafito en láminas vermiculares. La presencia del Al en la fundición nodular agrava la formación de los "pinholes" o sopladuras de hidrógeno, los que se producen por la reacción entre el Al y la humedad presente en las arenas de moldeo. La influencia del Al sobre las propiedades mecánicas de la fundición nodular, se muestra en la Tabla 3.12. Tan poco como 0.01 %Ce o 0.014% de tierras raras en total, nulifican la influencia nociva de 0.50 %Al.

Aproximadamente de 1.00% a 1.50 %Al se encuentra presente en las a -



aleaciones de FeSi usadas en la inoculación de la fundición nodular. Las aleaciones de ferrosilicio magnesio, también contienen Al en cantidades de hasta 1.25%. Es por ello que debe hacerse el máximo esfuerzo para minimizar la cantidad de las aleaciones de tratamiento e inoculantes en la producción de fundición nodular.

TABLA 3.12.- EFECTO DEL ALUMINIO SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS

	Coladas					
	1	2	3	4	5	6
Carbono total	3.46%	3.46%	3.48%	3.48%	3.36%	3.36%
Silicio	2.48	2.48	2.07	2.10	2.05	2.01
Fósforo	0.035	0.035	0.019	0.019	0.029	0.029
Azufre	0.008	0.008	0.008	0.011	0.010	0.013
Manganeso	0.20	0.20	0.02	0.02	0.02	0.02
Níquel	0.74	0.74	0.74	0.73	0.86	0.90
Magnesio	0.11	0.11	0.068	0.070	0.076	0.078
Cromo	0.05	0.05	-	-	-	-
Cobre	0.08	0.08	-	-	-	-
Aluminio	0.02	0.55	-	0.04	0.08	0.13
Carbono equivalente	4.20	4.20	4.08	4.11	3.98	3.96
	Bruto de colada, bloque en "y" de 1"					
R. a la t., Kg/mm <sup>2</sup>	52.52	58.67	46.97	48.20	47.39	43.80
Lím. de f., Kg/mm <sup>2</sup>	34.87	39.23	-	-	-	-
Elongación, %	16.5	12.0	20.0	18.0	20.0	6.0
BHN	179	186	162	174	158	164

e) **ANTIMONIO.**- En la fundición nodular no pueden tolerarse cantidades superiores a 0.004 %Sb. El Sb se combina con el Mg para formar un compuesto estable. Este reduce la cantidad de Mg disponible para la nodulización. El Sb por encima de 0.002% estabiliza la perlita en la fundición nodular. Además, tiende a segregarse en los bordes de grano o células y produce la formación de una malla de grafito, tal como se observa en la Figura 3.14.

f) **BISMUTO.**- La presencia de 0.003 %Bi origina la formación de pequeñas cantidades de láminas o malla de grafito en la fundición nodular, con una correspondiente reducción en la resistencia a la tracción, elongación y resistencia al impacto. A un nivel de 0.005 %Bi, el grafito está casi completamente laminar. El máximo contenido de Bi que puede tolerarse en la fundición nodular es 0.002%.

TABLA 3.13.- EFECTO DEL ANTIMONIO SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS

	Coladas			
	1	2	3	4
Carbono total	3.42%	3.42%	3.42%	3.45%
Silicio	2.06	2.20	2.16	2.27
Manganeso	0.02	0.02	0.02	0.02
Azufre	0.014	0.013	0.013	0.011
Fósforo	0.024	0.024	0.024	0.023
Níquel	0.72	0.79	0.76	0.79
Magnesio	0.046	0.055	0.047	0.081
Cerio	-	-	-	0.015
Antimonio	-	0.004	0.012	0.022
Carbono equivalente	4.04	4.08	4.07	4.13
	Bruto de colada, bloque en "Y" de 1"			
R. a la t., Kg/mm <sup>2</sup>	49.60	46.64	57.46	53.57
Elongación, %	17.0	2.0	Nada	12.0
BHN	178	212	232	207
Estructura	Buena nodu- laridad, e sencialmen- te ferrita.	Algo lami- nar con in- cremento de perlita.	Mayormente perlita y algunas lá- minas.	Buena nodu- laridad y con más perlita q' en la cola- da 2.

TABLA 3.14.- EFECTO DEL BISMUTO SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS

	Coladas			
	1	2	3	4
Carbono total	3.44%	3.44%	3.44%	3.39%
Silicio	2.07	2.16	2.27	2.26
Manganeso	0.02	0.02	0.02	0.02
Azufre	0.023	0.012	0.011	0.014
Fósforo	0.024	0.024	0.024	0.024
Níquel	0.65	0.72	0.70	0.78
Magnesio	0.049	0.072	0.054	0.096
Cerio	-	-	-	0.021
Bismuto	0.0005	0.003	0.005	0.006
Carbono equivalente	4.06	4.09	4.12	4.07
	Bruto de colada, bloque en "Y" de 1"			
R. a la t., Kg/mm <sup>2</sup>	49.11	44.72	30.74	51.32
Elongación, %	17.0	10.0	Nada	16.0
BHN	174	155	187	173
Estructura	Buenos nó- dulos, e - sencialmen- te ferrita.	Grafito la- minar con perlita.	Láminas y ocasiona - les esfe- roides.	Buena nodu- laridad.

g) ZIRCONIO.- La cantidad de Zr que puede tolerarse en la fundición nodular, a proximadamente es 0.01%. Este elemento distorsiona los esferoides de grafito y promueve la formación de grafito laminar.

### 3.9. INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS QUE PROMUEVEN LA PERLITA Y CARBUROS

a) CROMO.- Los siguientes son los niveles aproximados de Cr para los diferentes grados de fundición nodular:

- En las ferríticas en bruto de colada, el nivel de Cr debe ser lo más bajo posible. Puede tolerarse hasta un máximo de 0.04%.
- En una fundición nodular totalmente perlítica, puede tolerarse 0.10 %Cr.
- Para propósitos de resistencia al desgaste y a la abrasión, puede añadirse hasta 0.30 %Cr.
- En las austeníticas el contenido de Cr se especifica en cada grado.

El Cr es un potentísimo estabilizador de carburos y perlita y es particularmente, perjudicial a la estructura ferrítica en bruto de colada. Por otro lado, el Cr se añade ocasionalmente para incrementar la resistencia al desgaste y la dureza en piezas de secciones gruesas. El Cr retarda el recocido de ferritización. El tiempo de ferritizado se incrementa por la descomposición de la perlita. Contenidos de Cr superiores a 0.10% en la fundición nodular, no pueden ser recocidos.

El Cr se introduce dentro del baño con los componentes de la carga, principalmente con las chatarras de acero.

El Cr aumenta la resistencia a la oxidación y a la corrosión en las fundiciones nodulares austeníticas. El Si se emplea en combinación con el Cr, para minimizar la formación de carburos y para mejorar las propiedades mecánicas.

b) BORO.- El boro es uno de los elementos más potentes que forman carburos, si está presente en la fundición nodular. Los carburos de B tienden a localizarse en los bordes de grano. A medida que incrementa el contenido de B, estos carburos tienden a envolver más granos en un modelo reticular. Se ha observado la presencia de estos carburos, cuando el B está presente en cantidades tan pequeñas como 0.002%, y también se ha observado a este nivel un dete -

rioro en las propiedades de impacto. La Tabla 3.15 presenta la influencia nociva del B sobre las propiedades mecánicas. En fundiciones nodulares fuertemente hipereutécticas, se ha observado que el B es la causa de la formación del defecto conocido como "chill inverso". Se recomienda que el B nunca exceda de 0.002%, si se desean óptimas propiedades mecánicas.

TABLA 3.15.- EFECTO DEL BORO SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS

	Coladas			
	1	2	3	4
Carbono total	3.68%	3.68%	3.68%	3.68%
Silicio	2.43	2.43	2.43	2.43
Fósforo	0.035	0.035	0.035	0.035
Azufre	0.012	0.012	0.012	0.012
Manganeso	0.21	0.21	0.21	0.21
Níquel	0.63	0.63	0.63	0.63
Magnesio	0.042	0.042	0.042	0.042
Cromo	0.05	0.05	0.05	0.05
Cobre	0.08	0.08	0.08	0.08
Boro	-	0.018	0.041	0.105
Carbono equivalente	4.41	4.41	4.41	4.41
	B. de C., bloque en "y" de 1"			
Resistencia a la tracción, Kg/mm <sup>2</sup>	56.18	57.93	53.93	46.72
Límite de fluencia, Kg/mm <sup>2</sup>	36.49	37.58	30.55	31.25
Elongación, %	14.0	10.5	5.0	1.0
BHN	179	196	207	228

Las principales fuentes de B son, usualmente, chatarra de hierro y acero esmaltado vítreo, chatarra de maleable, carbón antracítico calcinado y revestimientos no vitrificados de hornos sin núcleo.

c) ESTANO.- Los requerimientos de contenido de Sn en las fundiciones nodulares, son como sigue:

- En las ferríticas sólo puede tolerarse 0.01 %Sn.
- El Sn en cantidades de 0.03% a 0.08% se usa para producir fundiciones nodulares perlíticas, dependiendo del tamaño de sección de la pieza.

El Sn es un fortísimo formador de perlita en la fundición nodular, sin embargo, no promueve la formación de carburos primarios, aún cuando se añada en exceso de 0.15%. La influencia de la estabilización de la perlita es por lo menos 10 veces la del Cu y 6 veces la del Cr. El Sn es considerado más como un elemento aleante antes que un elemento perjudicial o residual. El Sn, en realidad tiende a mejorar la forma nodular del grafito esferoidal.

Una adición de 0.05 %Sn a una fundición nodular ferrítica en bruto de colada, con 0.20 %Mn, produce una fundición nodular completamente perlítica con las siguientes propiedades mecánicas: resistencia a la tracción = 71.01 Kg/mm<sup>2</sup>, elongación = 4.6% y dureza = 260 BHN.

Además de las mejoras de las propiedades a la temperatura ambiente, una adición de 0.08% a 0.10 %Sn mejorará la resistencia a la formación de cascarilla y crecimiento en el rango de temperaturas de 482 °C a 649 °C.

TABLA 3.16.- EFECTO DEL ESTAÑO SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS

	Coladas			
	1	2	3	4
Carbono total	3.49%	3.49%	3.49%	3.34%
Silicio	2.08	2.05	2.02	2.11
Manganeso	0.02	0.02	0.02	0.02
Azufre	0.010	0.010	0.011	0.011
Fósforo	0.023	0.023	0.022	0.022
Níquel	0.66	0.69	0.66	0.66
Magnesio	0.047	0.049	0.044	0.044
Estaño	-	0.014	0.016	0.022
Carbono equivalente	4.11	4.11	4.09	3.99
	B. de C., bloque en "Y" de 1"			
Resistencia a la tracción, Kg/mm <sup>2</sup>	43.94	60.82	64.54	69.96
Elongación, %	13.0	10.0	4.0	4.0
BHN	156	208	239	249
Microestructura	Nodular	Nodular	Nodular	Nodular
%Ferrita	90	30	5	2
%Perlita	10	70	95	98

d) ARSENICO.- El As tiene un pequeño efecto sobre la formación de grafito esférico y, por lo tanto, no se clasifica como un elemento perjudicial. Sin embargo, es un estabilizador de perlita muy potente y una cantidad tan pequeña como 0.045% produce una microestructura conteniendo 95% de perlita. La cantidad máxima de As que puede ser tolerada en la fundición nodular es 0.02%.

e) VANADIO.- El V tiene un efecto sobre la fundición similar al Cr. Ocasionalmente, se usa en unión con el Ni y Mo para incrementar la resistencia a la tracción y dureza en piezas con secciones que exceden a 3". El máximo que no puede excederse en los grados ferríticos es 0.02%. Por encima de 0.20% tienden a formarse carburos masivos, aún en piezas de secciones gruesas.

TABLA 3.17.- EFECTO DEL ARSENICO SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS

	Coladas		
	1	2	3
Carbono total	3.43%	3.51%	3.51%
Silicio	2.10	2.01	2.08
Manganeso	0.02	0.02	0.02
Azufre	0.011	0.012	0.013
Fósforo	0.023	0.023	0.023
Níquel	0.74	0.62	0.60
Magnesio	0.047	0.045	0.045
Arsenico	-	0.025	0.046
Carbono equivalente	4.06	4.11	4.13
B. <sub>2</sub> de C., bloque en "Y" de 1"			
Resistencia a la tracción, Kg/mm <sup>2</sup>	47.88	56.21	65.65
Elongación, %	13.0	12.0	3.0
BHN	177	185	266
Microestructura	Nodular	Nodular	Nodular
%Ferrita	90	50	5
%Perlita	10	50	95

### 3.10. INFLUENCIA DE LOS GASES

a) OXIGENO.- El oxígeno se reduce a bajos niveles por la capacidad desoxidante muy potente ejercida por el Mg. La efectiva desoxidación del baño es, aparentemente, esencial al proceso y es obvio que consume algo del Mg disponible. Existe, sin embargo, especulación en cuanto a que cantidades de óxido muy pequeñas, benefician a la esferoidización del grafito y a la efectividad de la inoculación.

Los fierros base no tratados, tienen contenidos de oxígeno que hasta cierto punto reflejan el proceso de fusión. El contenido de oxígeno de un hierro base fundido en cubilote básico, es aproximadamente 0.009% (90 partes por millón), mientras que una colada en cubilote ácido ha analizado 0.135 % (135 partes por millón). Cuando se trató con suficiente aleación para esferoidizar efectivamente el grafito, el contenido de oxígeno en el hierro del cubilote básico se redujo a 0.0015% y a 0.0033% en el hierro del cubilote ácido.

El nivel de oxígeno presente en un hierro base fundido en cubilote ácido, conteniendo 30% de Sorelmetal en la carga, usualmente, está en el rango de 0.006 %0. También, se ha evaluado el nivel de oxígeno en un hierro base fundido en cubilote ácido con una carga alta en arrabio, y es igual a 0.006 %0. Cuando se usó el proceso Duplex con un horno de arco eléctrico y tratado con

Mg, el nivel de oxígeno se redujo a 0.004%. La fusión en frío con una carga alta en arrabio en el mismo horno eléctrico, produce un fierro tratado con un contenido de oxígeno de 0.0033%.

Las prácticas de fusión y la elección de la carga, definitivamente, influyen mucho en el contenido de oxígeno. Se compararon 2 operaciones en horno eléctrico de arco indirecto. Una operación resultó en un fierro base con un, relativamente, alto contenido de oxígeno de 0.010% y 0.005% en el fierro tratado. La segunda operación, con una carga precisamente controlada y un programa de fusión, tuvo solamente 0.0018% cuando se trató el fierro.

Los productores de fundición nodular intentan controlar el oxígeno de sus principales fuentes, como son: la carga, combustión del combustible, práctica de fusión, exposición y manipuleo del metal.

b) HIDROGENO.- Existe un gran interés por aprender acerca de la influencia del hidrógeno sobre las propiedades de las fundiciones nodulares. Sin embargo, el hidrógeno es reconocido por ser un estabilizador de carburos muy potente por lo tanto, debe controlarse a muy bajos niveles en los baños de fundición nodular. También, se ha observado que el hidrógeno aumenta el grado de propensión al sobreenfriamiento en los fierros tratados con Mg.

La determinación de la influencia de este elemento gaseoso, es muy compleja. La muestra del contenido de hidrógeno debe tomarse del baño y mantenerse en nitrógeno líquido, dado que este elemento se difunde muy fácilmente de la muestra a temperatura ambiente. El hidrógeno fragiliza al acero temporalmente sólo hasta que se difunda desde el sólido. Este fenómeno puede también aplicarse a las fundiciones nodulares.

El hidrógeno, posiblemente, desempeña una parte importante en la producción del chill inverso o el defecto de carburos en la línea central, a medida que el hidrógeno migra a la última porción a solidificar ya que este es rechazado progresivamente del baño. Frecuentemente, se ha observado pinholes asociados con los carburos, indicando que el último metal a solidificar está más saturado con el gas y de este modo puede imponer más drásticamente su acción civa. Niveles de hidrógeno observados en la fundición nodular, están en el rango de 0.0003% a 0.0015%. Un contenido de hidrógeno en exceso de 0.0003% tiende a estabilizar la perlita y promover la formación de carburos.

c) NITROGENO.- El gas nitrógeno seco se emplea para la inyección y técnicas de desgasificación, y no es, particularmente, perjudicial en este estado, tampoco se incrementa su contenido. Frecuentemente, el gas nitrógeno seco se emplea para desgasificar el hidrógeno, por la técnica de inyección con lanza o por el reciente proceso de desgasificación por chorro, patentado en Inglaterra para desgasificar aceros.

Sin embargo, algo de nitrógeno disociado o atómico se disuelve en el baño. Este nitrógeno disuelto tiene algún efecto estabilizador de la perlita en los baños de fundición nodular. Concentraciones en el rango de 0.010% a 0.020% presentan tendencia a estabilizar la perlita.

Afortunadamente, para la producción de los grados ferríticos en bruto de colada, el nitrógeno es rechazado durante el tratamiento con Mg. Este límite de solubilidad parece estar entre 0.008% y 0.009%; y hasta este límite, la influencia del nitrógeno es muy suave. Los fierros base fundidos en cubilote y horno eléctrico conteniendo hasta 0.015% de nitrógeno, rechazan nitrógeno durante el tratamiento con Mg hasta niveles de 0.008% a 0.002%, dependiendo del nivel inicial de nitrógeno en el hierro base.

Incrementando los niveles de C y Si se reduce el nivel de solubilidad del nitrógeno en los fierros fundidos. En los arrabios plateados de 16 %Si, usualmente, el contenido de nitrógeno está en el rango de 0.0035%. En vista de que se añade 1.00% o más durante el tratamiento y la subsiguiente inoculación, esto y la acción agitadora que ocurre en la reacción del tratamiento, puede explicar la reducción en nitrógeno que tiene lugar en la fabricación de fundición nodular. Muestras tomadas en el pie y en la superficie inferior de una serie de bloques de ensayo en bruto de colada parece que confirman estos niveles de solubilidad. Nitrógeno en exceso de estos niveles de solubilidad puede ingresar al hierro después del tratamiento, de almas en cáscara. El nitrógeno de estas fuentes pueden producir pinholes en las piezas. También, promueve la formación de perlita y tiene una tendencia a formar carburos.

El nitrógeno puede ser una forma prometedora para incrementar el límite de fluencia y la resistencia a la tracción, cuando está por encima de aproximadamente 0.008% en asociación con aleantes. El nitrógeno por encima de 0.09% puede añadirse después del tratamiento como cianamido de Ca u otro com -



puesto.

Reportes rusos indican que cada 0.001% incrementa la resistencia en casi  $0.84 \text{ Kg/mm}^2$ , presumiblemente con fierros de bajo contenido de Si. Esto puede explicar la inusual resistencia observada de una última adición de Mn. La aleación de ferromanganeso contiene apreciable contenido de nitrógeno (0.03 a 0.05%).



La fundición nodular de la más alta calidad, relativamente libre de óxidos y escoria, se producen por la introducción de la menor cantidad posible de Mg, requerida para dar origen a la formación de los esferoides de grafito sin deteriorarlos. En general, además de la composición consistente, los fierros base usados en la producción de fundiciones nodulares de alta calidad, deben tener las siguientes características:

- a) A fin de minimizar los requerimientos de Mg, se prefieren bajos contenidos de S, menores de 0.03%.
- b) Cuando se usan aleaciones de ferrosilicio magnesio, se recomienda contenidos de Si en el baño relativamente bajos de 1 a 1.50%.
- c) Contenido de C en el rango de 3.60% a 4.00%.
- d) Una escoria limpia libre de Fe con el menor % posible de óxido.

Este tipo de hierro base puede ser producido por fusión directa en cubilotes básicos, cubilotes sin revestimiento refrigerados con agua, hornos de inducción y hornos de arco. Sin embargo, los fierros base con alto S producidos en cubilote ácido, usualmente, requieren un posterior tratamiento de desulfurización, antes que ellos puedan usarse en la producción de las fundiciones nodulares. Los hornos de reverbero, hornos de tiro natural, hornos de arco indirecto y hornos de resistencia de barras de carbón, son usados para fundir el hierro base de la fundición nodular, sin embargo, son bastante limitados debido a los altos costos del material de la carga, uso de refractarios caros y altos requerimientos de combustible y energía.

Los cubilotes ácidos son usados por muchos fabricantes de fundición nodular, sin embargo en la actualidad, el mayor tonelaje se ha producido en hornos eléctricos y cubilotes sin revestimiento refrigerados con agua, los cuales funden los fierros base. A continuación se detalla las ventajas y desventajas de cada tipo de práctica de fusión.

#### 4.1. FUSION EN CUBILOTE ACIDO

Se han producido satisfactorias fundiciones nodulares, en cubilotes convencionales revestidos con refractarios ácidos con escorias ácidas. Muchos productores de fundición nodular eligen fundir con escorias ácidas para controlar el contenido de C en los fierros base usa -

dos en la producción de fundición nodular. Frecuentemente, sólo un cubilote es disponible para la fusión de diversos grados de fundición nodular y fundición gris. El proceso en cubilote ácido se presta por sí mismo, ya sea por la cantidad o producción limitada de la fundición nodular, de este modo la práctica de fusión es similar a la de una típica fundición gris.

La fusión ácida tiene otros atributos deseables. Como es un proceso más oxidante, el control se ejerce sobre los elementos más fácilmente oxidables, muchos de los cuales ejercen una influencia nociva sobre las propiedades y estructura de la fundición nodular, tales como Cr, B, Mn, Sb, H, etc. Se puede producir un buen hierro caliente con una relación más favorable de hierro a coque, sin la necesidad de soplar aire caliente. Sin embargo, el capital de inversión es una fracción del requerido para un cubilote sin revestimiento refrigerado con agua o para una unidad de fusión en horno eléctrico.

Las desventajas de la fusión ácida de los fierros base para la producción de fundición nodular, son las siguientes:

- a) La ganancia de S a partir del combustible puede estar en el rango de 0.07% a 0.12% o más, dependiendo de la cantidad y calidad del coque usado. Esto necesita una gran adición de Mg para producir grafito esferoidal o algún tipo de desulfurización tal como un tratamiento con carbonato sódico anhidro o con carburo de Ca usando el método del "tapón poroso", previo al tratamiento con Mg.
- b) Los materiales de la carga deben contribuir con el suficiente C para mantener el %C del hierro base dentro del rango especificado. Esto, usualmente, significa que aproximadamente el 40% de la carga del cubilote debe consistir de un hierro con alto C.

Se usan canales de escoriado frontal y trasero. Debe operarse con una cantidad mínima de coque con bajo S. Esto ayudará a mantener el %S del hierro base, en los niveles más bajo posibles.

En la Tabla 4.1 se presenta una carga típica en cubilote ácido, para producir un hierro base. No se requiere ninguna especificación especial para la construcción del cubilote ácido empleado en la fusión del hierro base ácido.

TABLA 4.1.- BALANCE DE CARGA EN CUBILOTE ACIDO, PARA OBTENER UN FIERRO BASE TIPICO

Material cargado Tipo	%	% Silicio		% Azufre		% Fósforo		% Manganeso		% Carbono	
		Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga
Sorel metal	40.00	0.10	0.040	0.02	0.008	0.02	0.008	0.15	0.060	4.20	1.680
Chatarra de acero	19.00	0.15	0.028	0.03	0.006	0.02	0.004	0.60	0.011	0.25	0.047
Retornos	40.00	2.50	1.000	0.01	0.004	0.02	0.008	0.20	0.080	3.70	1.480
Arrabio pla teado	1.00	20.00	0.200	0.05		0.05		0.90	0.009	0.30	0.003
Análisis cargado	100.00		1.268		0.018		0.020		0.160		3.210
Pérdida o ganancia de fusión			-0.10		+0.050				-0.020		+0.60
Análisis es timado			1.168		0.068		0.020		0.140		3.810

Requerimiento de coque : 14% a 15% de la carga metálica.

Requerimiento de caliza : 20% a 25% de la carga de coque.

#### 4.2. FUSION EN CUBILOTE DE ESCORIA BASICA

Esta discusión se restringe a las prácticas de fusión "básica" debido a que la fusión en escoria básica se usa para producir el fierro base de una mayor parte de la fundición nodular producida en el mundo. Básicamente operados, los cubilotes pueden ser revestidos con refractarios básicos o no ser revestidos, del tipo sin refractarios refrigerados con agua. En las primeras etapas del desarrollo de las técnicas de producción de la fundición nodular, se usaron ampliamente los cubilotes revestidos con refractarios básicos, para producir los fierros base. Sin embargo, debido al alto costo del refractario, a los problemas de operación y a las dificultades en el control de la composición del metal, este tipo de fusión del fierro base ha sido abandonado en favor del cubilote refrigerado con agua, aún cuando actualmente se operan un número muy limitado de cubilotes con revestimiento básico. Por esta razón, se tratará brevemente, este tipo de cubilotes.

Las ventajas de la fusión en cubilote básico para producir fierros base en la producción de fundición nodular, son las siguientes:

- a) Se obtienen fierros base con muy bajo S. La escoria básica convierte a los sulfuros de Fe y al S del coque en sulfuro de Ca, el cual es insoluble en el Fe.
- b) Se producen fierros base con contenidos de oxígeno muy bajos.
- c) Permite el uso de materiales de la carga de bajo costo. La chatarra de acero puede reemplazarse por arrabio, en la producción de fundiciones nodulares perlíticas.
- d) Se reducen considerablemente los costos de la adición de Mg y no se requiere la desulfurización del fierro base.
- e) Da una total ventaja de la alta temperatura del fierro con bajo contenido de S.
- f) Se obtienen fierros base con alto C, más fácilmente que en la práctica ácida, debido a que la escoria básica limpia el coque y hace posible una mayor ganancia de C.
- g) El cubilote refrigerado con agua operado básicamente, reduce sustancialmente el costo del refractario.
- h) Las operaciones en el cubilote sin refractario refrigerado con agua, pueden reducir los costos de mano de obra al operar varios

días o semanas, sin descargar por el fondo.

Las principales desventajas de la operación del cubilote básico, son las siguientes:

- a) La pérdida de Si es alta y puede ser tan alta como 35% bajo escorias muy básicas.
- b) Las velocidades de fusión son considerablemente más lentas en las operaciones de fusión básica, comparadas con las operaciones de fusión ácida, debido a los grandes requerimientos de coque.
- c) Se requiere una constante y continua velocidad de operación, si se mantiene alguna consistencia en la composición del metal. Esto es particularmente cierto con relación a los cambios en el contenido de C.

Los cubilotes básicos deben operarse sobre una base continua estable, si se mantiene algún aspecto de control. Deben evitarse suspensiones en el trabajo, si se quiere que la composición del metal permanezca razonablemente constante. La fusión con escoria básica en los cubilotes sin refractario refrigerados con agua, ofrecen los costos potenciales más bajos para la producción de grandes tonelajes de hierro base. El proceso es relativamente nuevo y la operación es diferente del método de fusión con escoria ácida, comparativamente simple. Si el cubilote es revestido, el refractario usado en la zona de fusión es básico o neutral. Los ladrillos de magnesita o Gundol son básicos, mientras que los bloques de carbón o pasta de carbón empleados en el fondo, son neutrales. La mayor parte del tonelaje de fundición nodular producido en U.S.A., se funde en cubilotes sin refractario refrigerados con agua, del tipo mostrado en la Figura 4.1. Este tipo de cubilote tiene una carcasa refrigerada con agua, toberas refrigeradas con agua y el fondo revestido con carbón. El agua, en vista de que es menos costosa que los refractarios, es no obstante un costo directo, y una falla en el sistema de agua puede resultar en la pérdida completa de toda la unidad de fusión. Estos cubilotes, no son recomendables en diámetros menores de 50", debido a que las temperaturas del canal de sangrado no pueden mantenerse firmemente, a consecuencia de la relación del diámetro del cubilote a la circunferencia refrigerada con agua, del cubilote. Es obligatorio un antecrisol de inducción para pequeños cubilotes sin refractario, opera-

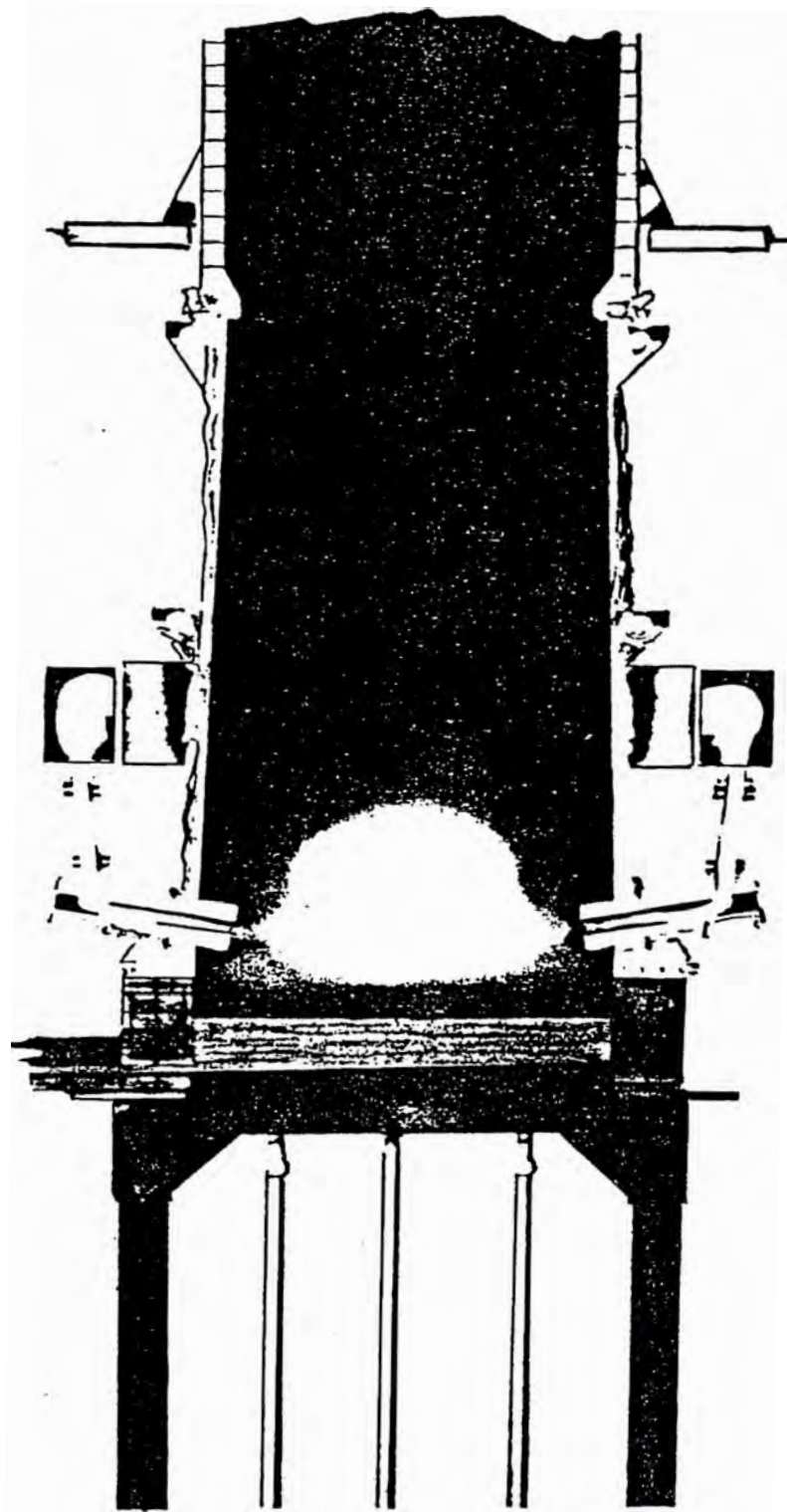


FIGURA 4.1.- Sección transversal de un cubilote sin refractario, refrigerado con agua.



dos con una escoria básica y deseable para cubilotes sin refractario refrigerados con agua, de grandes capacidades. La velocidad de fusión, normalmente, es casi 30% menor en las operaciones con cubilote básico, que en los cubilotes ácidos de tamaño equivalente.

Una de las diferencias esenciales entre la fusión ácida y básica, es la composición de la escoria. Los componentes ácidos en una escoria de cubilote son: sílice ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Los componentes básicos de la escoria son: óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) proveniente de la adición de caliza y óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ). La relación entre los constituyentes básicos y ácidos de la escoria, se denomina "relación de basicidad". Una relación de basicidad de 1.0 se considera neutral. Valores por debajo de 1.0 se considera ácidos y por encima de 1.0 son básicos.

$$\text{Basicidad} = \frac{\text{MgO} + \text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Algunos fundidores sólo usan la relación entre los materiales básicos y la sílice, descontando la influencia del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Los componentes ácidos y básicos de la escoria, provienen de los siguientes materiales:

Materiales que producen escoria ácida

- a) Cenizas y S del coque.
- b) Arena sílice del canal de sangrado.
- c) Si oxidado de la carga.
- d) Oxido de Fe de la carga.

Materiales que producen escoria básica

- a) Caliza.
- b) Ladrillo de magnesita.
- c) Gundol ( $\text{MgO}$ )
- d) Fluorita.

Los operadores del cubilote básico deben conocer la composición química de la escoria y ser capaces de calcular la relación de basicidad de los componentes de la escoria.

TABLA 4.2.- ANALISIS DE ESCORIAS, EN %s - MUY BASICO A ACIDO

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	FeO	MnO	CaO+ MgO	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ratio	S en la escoria
Muy básico-muy reductor (0.008 %S en el baño) Desintegrable-polvo blanco	16.1	3.45	62.40	8.1	0.28	Traz	70.5	19.6	3.6/1	0.90
Muy básico - reductor (0.008 %S en el baño) Desintegrable - gris	19.7	3.20	61.45	7.1	0.27	0.06	68.6	22.9	3.0/1	1.02
Básico - oxidante (0.021 %S en el baño) Polvo arenoso	26.0	3.90	65.40	2.2	0.33	0.30	67.6	29.8	2.3/1	0.90
Básico - oxidante (0.03 %S en el baño) I oscuro a II claro ac/R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	I 30.5 II 28.7	3.90 6.90	46.90 47.90	14.3 12.7	1.44 1.73	0.36 0.35	61.2 60.6	34.4 35.6	1.8/1 1.7/1	0.48
Básico - oxidante (0.04 %S en el baño) Color arenoso opaco	29.3	9.50	55.40	2.2	0.32	1.38	57.6	38.8	1.5/1	--
Neutral (0.05/0.07 %S en el baño)	33.6	13.10	34.60	12.4	1.50	2.70	47.0	46.7	1.0/1	1.00
Acido - típico (0.09/0.10 %S en el baño) Vítreo	46.2	11.00	37.20	1.4	1.10	1.40	38.6	57.2	0.7/1	--
Acido - oxidante (0.09/0.12 %S en el baño) Viscoso y negro	47.1	12.10	22.00	1.6	6.90	4.60	23.6	59.2	0.4/1	--

En la Tabla 4.2, se presentan análisis de escorias básicas a ácidas. La relación de basicidad para una escoria muy básica y reductora es 3.5. Observar que el baño es más oxidante y tiene menor capacidad desulfurante, con las más bajas relaciones. El %MnO es el mejor indicador del grado de oxidación en el baño. Valores en exceso de 0.50% reflejan una oxidación definida con alta pérdida de Si (40%). Cuando la relación de basicidad es controlada en casi 3.5, la fusión será bajo condiciones reductoras y las pérdidas de Si pueden mantenerse uniformemente entre 10% a 11%. Algunos fundidores calculan las bases como  $\text{CaO} + 2/3 \text{MgO}$ . Sin embargo, los datos consignados consideran  $\text{CaO} + \text{MgO}$ .

El contenido de C será muy alto bajo condiciones básicas y reductoras. Contrario a la opinión generalizada, el contenido de C de la carga tiene una significación relativamente pequeña sobre el %C del hierro base. La adición de materiales de la carga, de bajo C tales como el acero, aumentan el nivel de oxidación en el cubilote e indirectamente reducen el C. El contenido de C total permanecerá constante si la relación de basicidad permanece constante, debido a que en el cubilote básico, usualmente, se usa excesivamente el coque. Se elimina más S con las más altas relaciones de basicidad y con bajos niveles de oxidación, como se refleja por los bajos contenidos de MnO.

La escoria básica limpia al coque y este es el factor determinante en la ganancia del C. Cargas totales de acero pueden ganar sobre 4.00 %C. Si el C ya está presente, el porcentaje de ganancia es menor. El contenido de nitrógeno se reporta que es casi el doble de la operación ácida.

Los análisis de escoria presentados en la Tabla 4.3, se tomaron durante cada día de operación y deben compararse con los datos de las coladas 1, 2, 3 y 4. La unidad de fusión empleada fue un cubilote externamente refrigerado con agua, de 120" de diámetro interno con una unidad independiente de soplado de aire caliente a 540 °C.

La fluidez de la escoria se regula con adiciones de 92.5% de fluorita efectiva. Como se presenta, esto es 25% de la adición de caliza que asciende a 10% en peso de la carga metálica. Una excesiva cantidad de fluorita puede producir que la escoria sea espumosa. Operaciones

TABLA 4.3.- EFECTO DE LA COMPOSICION QUIMICA DE LA ESCORIA SOBRE LA COMPOSICION QUIMICA DEL METAL DE SANGRADO  
A.- COMPOSICION QUIMICA DE LA ESCORIA, (%)

Nº	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	FeO	MnO	S	CaO+ MgO	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ratio
1er. Día	16.1	3.45	62.40	8.1	0.28	Traz.	0.90	70.5	19.6	3.6/1
2	18.0	3.60	62.05	7.5	0.36	0.04	0.94	70.0	21.6	3.2/1
3	19.7	3.20	61.45	7.1	0.27	0.06	1.02	68.6	22.9	3.0/1
4	22.8	4.85	63.10	5.8	0.28	0.05	1.07	69.0	27.6	2.5/1
Promed.	19.1	3.80	62.25	7.1	0.28	0.04	0.98	69.4	22.8	3.0/1
2do. Día	21.1	4.60	65.60	2.8	0.24	0.07	1.07	68.5	25.7	2.7/1
6	21.7	4.60	64.90	2.0	0.25	0.08	1.08	66.8	26.2	2.5/1
7	22.9	5.90	65.00	2.2	0.29	0.14	0.94	67.1	28.8	2.3/1
Promed.	21.9	5.00	65.20	2.3	0.26	0.09	1.03	67.5	26.9	2.5/1
3er. Día	21.4	3.80	66.90	2.4	0.24	0.06	1.00	69.2	25.2	2.8/1
9	21.3	4.00	66.80	1.8	0.25	0.10	1.00	68.8	25.3	2.7/1
10	22.6	4.40	65.80	2.2	0.24	0.09	1.07	68.0	27.0	2.5/1
Promed.	21.8	4.10	66.50	2.1	0.24	0.08	1.02	68.6	25.9	2.6/1
4to. Día	23.4	3.45	66.50	1.4	0.25	0.11	0.86	67.8	26.8	2.5/1
12	25.9	3.90	65.40	2.2	0.33	0.30	0.90	67.6	29.8	2.3/1
13	26.0	3.90	64.80	2.0	0.30	0.52	0.78	66.7	29.9	2.2/1
Promed.	25.1	3.75	65.60	1.9	0.29	0.31	0.85	67.5	28.9	2.3/1

B.- COMPOSICION QUIMICA DEL METAL, (%)

	C total antes/ después Mg	Si antes/ después Mg	S antes/ después Mg	Mg	(a)	(b)	(c)	(d)
1	4.14/3.72	1.57/2.81	0.009/0.007	0.021	1,516	11	8,800	426.7
2	4.04/3.76	1.58/2.85	0.010/0.006	0.021	1,516	10	8,800	426.7
3	3.68/3.56	1.61/2.98	0.007/0.007	0.025	1,471	11	9,200	443.3
4	3.72/3.58	1.69/2.57	0.008/0.008	0.028	1,516	15	11,600	448.9
5	3.76/3.60	1.62/2.76	0.007/0.008	0.023	1,516	13	10,900	460.0
6	4.04/3.72	1.55/2.76	0.008/0.006	0.024	1,504	12	10,800	471.1
7	3.94/3.64	1.32/2.78	0.009/0.008	0.018	1,493	11	10,200	476.7
8	3.98/3.68	1.56/2.78	0.005/0.005	0.018	1,493	17	12,200	471.1
9	3.94/3.72	1.35/2.55	0.009/0.007	0.012	1,504	16	12,200	471.1
10	3.72/3.80	1.42/2.40	0.005/0.006	0.015	1,493	15	11,800	471.1
11	4.06/3.80	1.38/2.55	0.008/0.007	0.008	1,471	13	9,000	398.9
12	3.60/3.52	1.10/2.50	0.021/0.007	0.018	1,471	16	10,400	465.6
13	3.52/3.38	0.95/2.45	0.025/0.007	0.008	1,448	18	9,200	398.9

(a) Temperatura de sangrado (spout), en °C.

(b) Presión del aire soplado, en onzas de Hg.

(c) Velocidad del aire soplado, en pies cúbicos por minuto.

(d) Temperatura del aire caliente soplado, en °C.

Nota.- El metal de la colada Nº 13, presenta grafito laminar.

menos básicas, más típicas de las que se encuentran en la mayoría de operaciones de fusión básica, emplean aproximadamente 6% de piedra caliza y 0.5% a 1.5% de fluorita.

La altura del dique para escoria es regulado para mantener una profundidad controlada de la escoria en el fondo o pozo, sin embargo, se especula que la escoria formada fresca altamente básica, proporcionará la función de desulfurización. En un cubilote revestido, la pérdida del refractario básico contribuye al volumen de la escoria.

En la práctica, relaciones de coque a metal de 1 a 7 y menos, pueden controlarse razonablemente con el soplado de aire caliente a temperaturas de 370 °C y mayores. Relaciones de 1 a 7.5 o 1 a 8 reflejan una oxidación periódica, descendiendo en barrena cargas con alto contenido de acero. Relaciones de 1 a 5 producen una condición de fusión más reductora, S a 0.02% y de 3.80 a 4.10 %C. En una relación de 1 a 7, normalmente, la pérdida de Si será entre 25 y 30% y la pérdida de Mn de 3 a 5%.

Bajo escorias de alta basicidad, con condiciones de fusión más reductoras, la obtención de temperaturas adecuadas en el canal de sangrado, se convierte en un reto. Unidades de soplado de aire caliente calentado externamente, se tornan casi obligatorios, recomendándose capacidades a 650 °C. Puede obtenerse un fierro en el canal de sangrado con casi 44 °C más caliente, cuando la temperatura del aire caliente se incrementa de 370 °C a 540 °C. Con relaciones de basicidad de 1.5, un cambio de 56 °C en la temperatura del aire caliente desviará el contenido de C en casi 0.15%. Con relaciones de basicidad mayores, el aire caliente no gobierna el contenido de C como en la fusión ácida, donde cada 28 °C de pre calentamiento del aire soplado contribuye en casi 0.05 %C.

Como en la operación ácida, velocidades de soplado altas o bajas afectan el C. Por ejemplo, en un cubilote sin revestimiento refrigerado con agua de 96" de diámetro interno, un cambio de 1,000 pies<sup>3</sup>/min. de aire, desviará el C en más o menos 0.10% con ningún cambio en la relación del coque. Este mismo grado de ajuste del C puede también realizarse por un ajuste en el peso del coque, una reducción de 15 lbs. de

265 lbs. por ton. del baño, bajará el C en casi 0.10%, sin embargo, incrementan los niveles de oxidación. Coques de bajo C del tipo usado en las operaciones en duplex en cubilote ácido para producir fundición maleable, pueden reducir efectivamente el C en el rango medio de basicidad; alturas de cama mayores sirven para reducir los niveles de oxidación y el grado de sensibilidad es minimizado. Alrededor de 10 lbs. adicionales por ton., mantendrá el C en niveles equivalentes, sin embargo, con menores pérdidas de Si.

El carburo de Ca es usado por muchos fundidores básicos y es completamente efectivo en el arranque, ya que es fuertemente básico y exotérmico. También se emplea el carburo de calcio por algunos operadores de cubilote ácido, para incrementar la temperatura en el canal de sangrado, sin embargo, se elimina algo de S.

En resumen, el término "operación en cubilote básico" es muy indefinido. Una definición más precisa es necesaria, el grado de basicidad, ya sea reductora o de un carácter más oxidante, etc.

Los cubilotes básicos pueden producir alto C, bajo S y fierros con bajo contenido de oxígeno a bajo costo. El fierro producido puede hacerse esferoidal con menor aleación de Mg que en los fierros se producidos en cubilotes ácidos, con alto S.

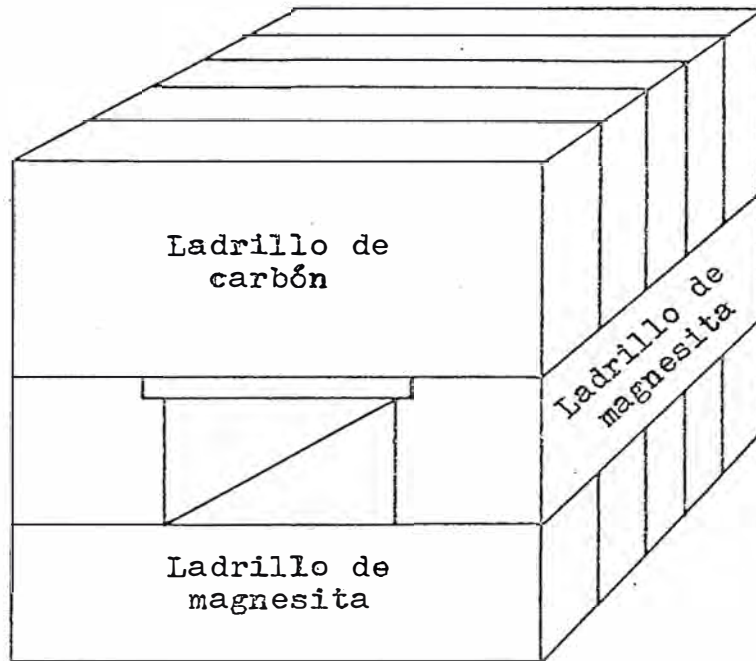
Recíprocamente, muchos de los elementos indeseables no son oxidados en el baño, al mismo grado como en las bajas relaciones de basicidad o en la fusión ácida. Algunos de estos son formadores de carburos. Los altos contenidos de C pueden ser un real problema y los ajustes necesariamente comprometen el control. Aún hay mucho que aprender acerca de la fusión en cubilote básico.

#### 4.3. FUSION EN CUBILOTE REFRIGERADO CON AGUA

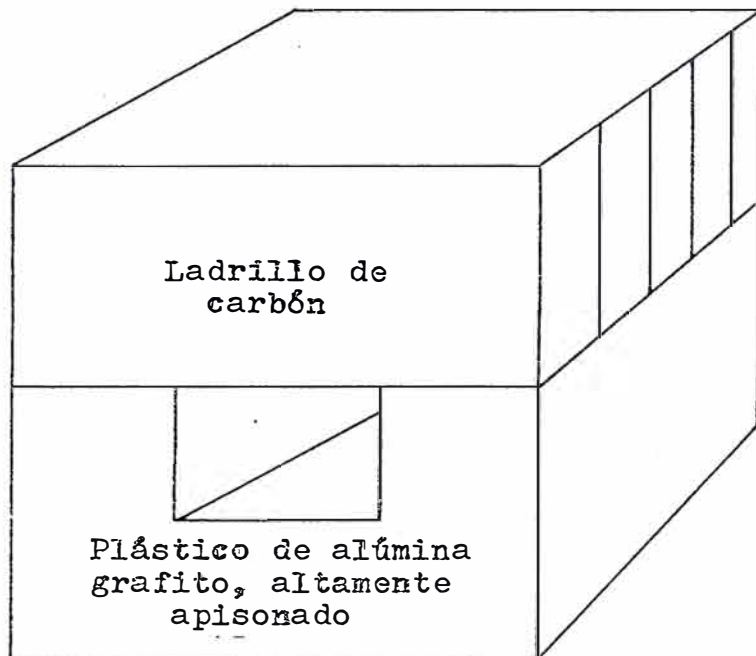
En los cubilotes refrigerados con agua, como se ilustra en la Figura 4.1, bloques de carbón y pasta de carbón son los únicos refractarios usados en el área inferior del cubilote. Para el pozo o fondo pueden también usarse refractarios apisonados, neutrales.

La píquera puede prepararse tal como se muestra en las Figuras 4.2 (a) y 4.2 (b), para operaciones que han demostrado mucho éxito

por 7 días de operación continua en un cubilote grande.



A



B

FIGURA 4.2.- Piqueras en cubilote básico.

Estas piqueras pueden mantenerse indefinidamente insertando una barra o plancha metálica y apisonando a su alrededor pasta de carbón. Puede usarse refractario de magnesita apisonado, como un material para la piquera en coladas de cubilote básico de, relativamente, poca duración.

La Figura 4.3, es una ilustración de una sección a través del hogar de un cubilote sin refractarios refrigerado con agua. Se presenta la disposición general, usada frecuentemente, de refractarios de carbón en el pozo o fondo y el suelo de arena cubierto con un refractario de magnesita.

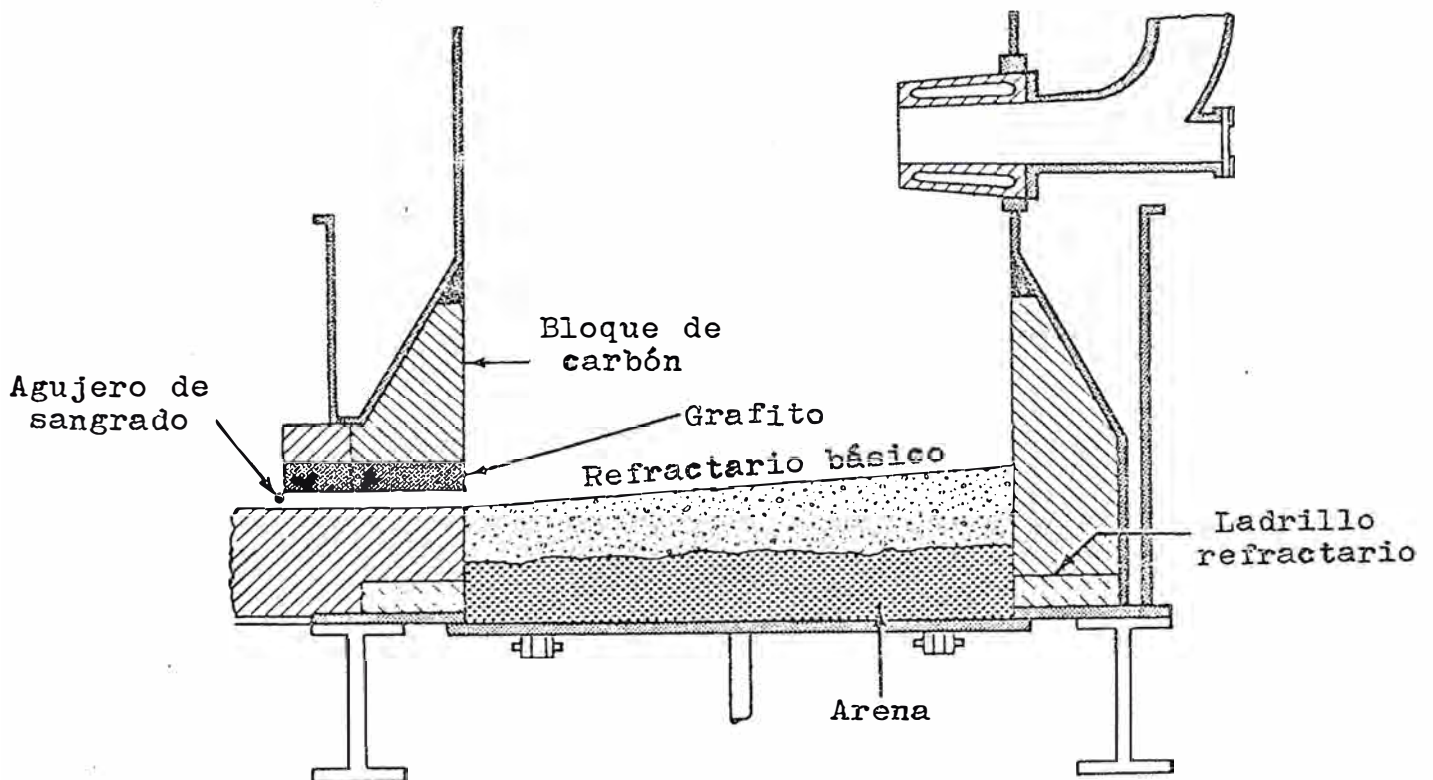


FIGURA 4.3.- Sección a través del hogar del cubilote.

La Figura 4.4, ilustra un método usado en el revestimiento de un canal de escoriado frontal, en un cubilote con un refractario plástico carbonífero de alta alúmina (mayor de 86%). Después de apisonar "in situ" el fondo del canal de escoriado frontal con un apisonador neumático, se apisonan alrededor de moldes de madera, el pozo en la parte fron



tal de la piquera, el dique para escoria, el canal de sangrado y el canal de escoriado. Para facilitar el retiro de los moldes del refractario apisonado, se emplean revestimientos de grasa o una cubierta de papel sobre los moldes. Además, son necesarios desfogues en los moldes para ayudar al retiro de los moldes. Los canales de escoriado frontal también se revisten con refractario de magnesita apisonado y combinaciones de ladrillos de carbón y magnesita.

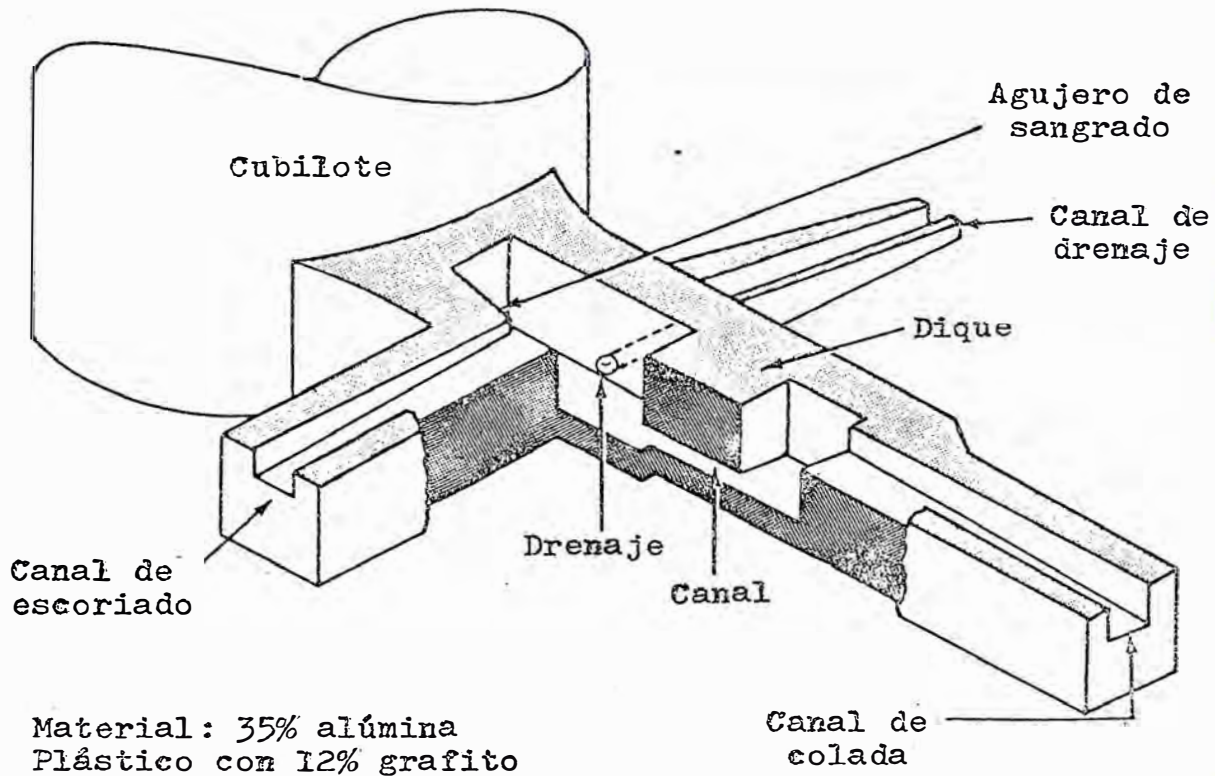


FIGURA 4.4.- Canal de escoriado frontal en un cubilote básico.

La altura del dique metálico para escoria está distanciado entre el extremo superior de la piquera y el rebose del fierro en el canal de sangrado. Esta dimensión es bastante crítica y debe medirse con un calibrador, cada vez que se repara. La altura del dique metálico para escoria, se determina por la siguiente fórmula:

$$\text{Altura del dique metálico (pulg)} = \frac{\text{Presión del aire soplado (onz)}}{4} + 1''$$

La pulgada de la fórmula, es para mantener aproximadamente 3" de escoria dentro del cubilote, a fin de ayudar a refinar el fierro, esto es, adicionalmente reducir el S y oxígeno. La ranura para la escoria es de 1/2 a 1" por encima del dique metálico.

En la construcción del canal de escoriado frontal, deben hacerse las provisiones en previsión de las altas presiones que requieren un reservorio relativamente profundo para la escoria y el fierro.

a) TOBERAS.- La operación óptima se obtiene cuando el área de las toberas es 20% o menos del área de la sección transversal del cubilote. No son satisfactorias las toberas continuas y deben reemplazarse por las toberas individuales refrigeradas con agua.

b) CAPACIDAD CALORIFICA Y CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL REVESTIMIENTO.- La capacidad calorífica o contenido de calor del ladrillo básico es aproximadamente 45% mayor que la del ladrillo sílice. Esto se determina por la fórmula:

$$H = \text{calor específico} \times \text{peso} \quad (\text{Temperatura} = 0 \text{ } ^\circ\text{C})$$

La capacidad calorífica de un ladrillo recto de magnesita es 1,930 Kcal. La capacidad calorífica de un ladrillo recto de carbón es 1,530 Kcal. La capacidad calorífica de un ladrillo recto de arcilla refractaria calcinada es 1,400 Kcal. La capacidad calorífica de un ladrillo recto de sílice es 1,090 Kcal.

Estos valores son para ladrillos a 1,420 °C. La relación también se mantiene para los diversos materiales de parchado monolítico. Las aproximadas conductividades térmicas de los ladrillos de sílice, arcilla refractaria calcinada y magnesita, se observa que son superiores. La curva de magnesita y la capacidad calorífica, claramente ilustra la importancia de una adecuada preparación de la cama de coque y la necesidad de un período más largo de recalentamiento que se usa en la práctica ácida, a fin de que el revestimiento este adecuadamente condicionado antes que empiece la fusión.

c) PREPARACION DEL LECHO DE ARENA.- El convencional lecho de arena es satisfactorio en los cubilotes básicos. Debe tenerse mucho cuidado para asegurar una adecuada mezcla y re-

sistencia. Debe usarse la cantidad exacta cada día a fin de que se mantenga aproximadamente un ahusamiento de 1 a 1 1/2", con ningún radio al rededor de la circunferencia del cubilote. En situaciones donde los cubilotes básicos son operados por varios días o una semana, para minimizar la posibilidad de escurrimientos es indispensable una capa de refractario básico sobre la arena, como se muestra en la Figura 4.3.

d) PREPARACION DE LA CAMA DE COQUE.- A causa de la alta conductividad térmica y capacidad calorífica del ladrillo básico y del carbón, es muy importante la preparación de la cama de coque. Deben usarse portadas de encendido con el objeto de asegurar la adecuada combustión y temperatura en el área del pozo. Los agujeros deben ser espaciados a intervalos de casi 120° sobre la circunferencia de la carcaza por encima del lecho de arena. Las toberas deben cerrarse en las primeras 1 1/2 horas del encendido para permitir que todo el aire ingrese por los agujeros de encendido. El pozo debe calentarse al rojo y aumentar grandemente la temperatura inicial de sangrado. El agujero puede tener la forma de un ladrillo y se apisona fácilmente antes de encender el ventilador.

El tiempo de recalentamiento en el orden de 1 a 2 horas después del "quemado completo" o un total de 4 horas del "encendido" al "encendido del ventilador", es necesario para establecer el mejor gradiente de temperatura entre el revestimiento y la cama de coque.

La cama de caliza se añade con el último tercio de la cama de coque. Es necesario añadir la caliza con la cama de coque, a fin de que pueda calcinar a la forma reactiva (CaO y MgO) antes que la operación comience. Con el objeto de tener una operación precisa, debe conocerse el peso de la cama de coque. La caliza se añade para neutralizar la ceniza del coque. La cantidad necesaria puede determinarse con la siguiente expresión:

$$\text{Peso de caliza} = \frac{\% \text{ceniza}_{\text{coque}} \times \text{peso}_{\text{coque}}}{(\% \text{CaO} + \frac{2}{3} \% \text{MgO})_{\text{caliza}}} \times \text{basicidad deseada (1.5)}$$

Debido al punto de solidificación muy alto de la escoria básica, se añade fluorita en la proporción de 1 a 4 o 5 de caliza. Esto puede reducirse, en vista del costo y basado en la experiencia, a medida

que la operación progrese.

La cama debe asentarse, ajustada a la adecuada altura y quemada completamente antes que comience el cargado. La cama debe calentarse al rojo y nivelarse. Antes del cargado puede añadirse una capa final.

Las normales alturas de cama son satisfactorias, dependiendo del peso del aire y la presión usada. La fórmula comúnmente más empleada para determinar la altura de cama es:

$$\text{Altura de cama (pulg)} = 10.5 \sqrt{\text{presión (onzas)}} + 6''$$

Las alturas de cama de coque para diferentes presiones se presentan a continuación, a fin de ayudar a la selección adecuada.

Presión del aire soplado (onz)	Altura de cama de coque (pulg)
10	39.5
12	42.5
14	45.5
16	48.0
18	50.5
20	53.0
22	55.5
24	57.5
26	59.5

El canal de sangrado del cubilote, el antecrisol y las cucharas deben precalentarse a una alta temperatura para minimizar la pérdida de la temperatura del metal, particularmente en el comienzo de la operación.

e) CARGADO.- En la preparación de la carga del cubilote, el detalle más importante es determinar la adecuada carga de coque. Se ha establecido definitivamente que 5 a 10 lbs. de coque por pie cuadrado de área de la sección transversal, debe usarse para la óptima eficiencia térmica y el control del C. Cuando se usan cargas de coque de esta magnitud, se obtiene una operación más eficiente que es la práctica usual, se carga menos S y ceniza que, a su vez, requiere menos caliza. La Tabla 4.4, presenta las cargas recomendables de coque (basado sobre

TABLA 4.4.- DATOS Y RECOMENDACIONES GENERALES PARA LA OPERACION DEL CUBILOTE BASICO

Diámetro interno pulg	Cubilote		Carga de coque lbs(d)	(a)	(b)	(c)	Carga metálica lbs(e)
	Area <sub>2</sub> pulg <sup>2</sup>	Area pie <sup>2</sup>					
32	804	5.6	56	19	4	175	308
36	1,018	7.1	71	26	5	222	426
42	1,385	9.6	96	38	7	300	624
48	1,810	12.6	126	53	10	395	882
54	2,290	15.9	159	72	14	500	1,193
60	2,827	19.6	196	94	19	615	1,568
66	3,421	23.8	238	122	24	745	2,023
72	4,072	27.6	276	149	30	860	2,484
84	5,542	38.5	385	220	44	1,190	3,658

- (a) Carga aproximada de caliza, para un S base de aproximadamente 0.03%, en lbs.
- (b) Carga aproximada de fluorita, en lbs.
- (c) Aire a través de las toberas, en lbs.
- (d) Carga de coque basada sobre 10 lbs por pie<sup>2</sup> de área del cubilote.
- (d) Cálculos basados sobre una carga de 60% de acero; aire a 15.6 °C y 60% de humedad relativa; recarburización a 3.66% de C final. Un incremento en la carga de acero, incrementará las calorías requeridas para fundir y sobrecalentar, disminuyéndose el metal producido. Lo mismo es cierto, de un aumento en el C final deseado y la humedad del aire soplado.

10 lbs. de coque por pie cuadrado) con las adiciones aproximadas de caliza y fluorita para diversos tamaños de cubilote. La cantidad precisa de caliza necesaria para producir una escoria básica satisfactoria, puede determinarse usando la siguiente fórmula:

$$\text{Peso de caliza en carga} = \frac{(\% \text{ ceniza en coque} \times \text{carga de coque}) + (\% \text{ Si oxidado} \times 2.1 \times \text{carga de fierro}) + (\% \text{ estimado de arena en la carga} \times \text{carga de fierro})}{(\% \text{ CaO} + \frac{2}{3} \% \text{ MgO}) \text{ en la caliza}} \times \text{basicidad deseada (usualmente 1.5 a 2.0)}$$

Las adiciones de fluorita (1 de fluorita a 5 de caliza) se efectúan con el objeto de minimizar los problemas en la eliminación de la escoria. A medida que mejoren las técnicas operacionales, deben reducirse las adiciones de fluorita. Para el cálculo inicial del requerimiento de caliza, se asumen las pérdidas de Si como 30 a 35% del Si cargado. Cuando se obtiene la pérdida de Si real en la operación, este valor debe aplicarse en la fórmula.

Es importante el empleo de equipos de cargado que dan una mejor distribución de la carga, particularmente el coque, a fin de obtener resultados uniformes. La canasta de fondo cónico es el único tipo de dispositivo de cargado mecánico que produce una razonablemente buena distribución.

f) AIRE Y SU IMPORTANCIA.- Una operación de cubilote bien controlada depende del suministro de un peso constante de aire. El peso del aire varía con la presión atmosférica y temperatura, además de la presión dentro del cubilote. Si no se controla el peso, el oxígeno disponible para la combustión variará tanto que no puede mantenerse una fusión y control uniforme. Debe emplearse un equipo de control del peso del aire. Las unidades más comunes son la Foxboro y la General Electric. Estos instrumentos automáticamente hacen las correcciones a 20 °C y presión atmosférica standard, para mantener un peso constante de oxígeno.

Aún cuando, casi todas las fundiciones le dan poca importancia al acondicionamiento del aire, es significativo que, para una unidad de muy buena fusión, se requiere 1 lb. de aire para fundir 1 lb. de

fierro. Un cubilote que funde 6 tons. de fierro por hora y consume 6 tons. de aire por hora; en un día caliente de verano, lluvioso (27 °C y 100% de humedad) requerirá 318.6 lbs. de coque adicional por hora (90% de carbono fijo) para satisfacer la reacción con la humedad del aire. La misma operación en invierno (5 °C y 25% de humedad) solamente necesitará 17.7 lbs. de coque adicional para la misma reacción.

El cálculo del consumo de coque para esta reacción, es casi tan importante como el cálculo para la recarburización y fusión, y hasta que esto se haga, es imposible el control preciso de la operación de fusión. Puede obtenerse un gran ahorro en el coque, instalando una unidad de deshumidificación o acondicionamiento del aire para reducir la humedad a un mínimo.

g) FUSION.- Con materiales de adecuado tamaño para el cubilote y conveniente distribución, el fierro debe verse a través de las toberas en aproximadamente 5 minutos, usando un peso normal de aire, como se muestra en la Tabla 4.4. Esta se basa en alturas de cama de 48" a 54" y presiones del aire soplado de 16 a 20 onzas.

Debe generarse suficiente metal y escoria en 20 a 25 minutos, para sangrar el cubilote. La escoria debe comenzar a fluir en aproximadamente 15 minutos. Para conservar la temperatura y facilitar el flujo de la escoria, se cubre el reservorio escoria-metal del canal de sangrado.

Debe mantenerse el nivel de carga durante la fusión para eliminar variables. Un cubilote con baja carga, usualmente, resulta en niveles altos de oxidación y S.

Evitar las paradas en la operación, en vista de que la capa de fierro en el pozo ganará un exceso de C, el cual puede ser perjudicial a la pieza en particular que se está colando.

Debe acumularse suficiente fierro, aproximadamente 3 cargas en el antecrisol, para uniformizar las fluctuaciones en la composición química.

La formación de puentes, usualmente, es una indicación de la insuficiente fluidez de la escoria, penetración deficiente del soplado o bajas temperaturas del metal. Las áreas de las toberas, tamaño de la

carga y las técnicas de cargado, deben examinarse primero. Puede mejorarse la deficiente fluidez incrementando la fluorita, la cual baja el punto de solidificación de la escoria. La formación de puentes es un problema muy raro, si se usa una buena práctica.

En ocasiones se presenta la escoria espumosa y esto se debe a una alta fluidez de la escoria; usualmente, esta condición se elimina reduciendo la adición de fluorita. En ocasiones debe reducirse la caliza y la fluorita. El análisis de S del hierro base nos determinará la magnitud de la reducción.

h) MATERIALES DE FUSION.- Las siguientes especificaciones pueden usarse para establecer el control de calidad sobre los materiales de carga del cubilote.

#### COQUE

- Clasificación: Buena
  - Tamaño : 1/12 del diámetro interno del cubilote (pulg)
  - Carbono Fijo : 90% mínimo
  - Ceniza : 6% máximo
  - Azufre : 0.5% máximo
  - Fósforo : 0.080% máximo
  - Indice Shatter sobre 3" : 85%
- Clasificación: Mediana
  - Tamaño : 1/10 a 1/14 del diámetro int. del cubilote
  - Carbono Fijo : 88% a 90%
  - Ceniza : 6% a 7%
  - Azufre : 0.5% a 0.6%
  - Fósforo : 0.100% máximo
  - Indice Shatter sobre 3" : 80%
- Clasificación: Pobre
  - Tamaño : Debajo de 1/14 o sobre 1/10
  - Carbono Fijo : 82% a 88%
  - Ceniza : 7% o más
  - Azufre : 0.6% o más
  - Fósforo : Mayor de 0.100%
  - Indice Shatter sobre 3" : 70%



## CALIZA

Tamaño : 2" x 3/4"

Análisis :  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$  95%

Condición: Debe mantenerse seca y estar libre de arcilla y arena.

La máxima desulfurización puede obtenerse con una escoria con teniendo bastante piedra dolomítica con alrededor de 16% a 20% de MgO en la escoria. Esto puede obtenerse usando una mezcla de piedra dolomítica y caliza como fundente. Una mezcla de 100 lbs. de piedra dolomítica y 50 lbs. de piedra caliza, por ton. de carga, es satisfactoria para producir un fierro con bajo S y con baja ganancia de C. Puede añadirse a esta mezcla 30 lbs. de espato, para aumentar la fluidez.

## FLUORITA PARA EL CUBILOTE

- Clasificación: Buena

Tamaño : 2 1/2" x 1" (también se encuentra disponible briquetas de fluorita, con lo que se reduce las pérdidas físicas)

Fluoruro de Ca: 70% mínimo

Oxido de Fe : 1% máximo

Plomo : 0%

$\text{SiO}_2$  : 5% máximo

- Clasificación : Mediana

Tamaño : Debajo de 2 1/2"

Fluoruro de Ca: 50% a 70%

Oxido de Fe : 2% máximo

Plomo : 0.10% máximo

$\text{SiO}_2$  : 5% máximo

- Clasificación : Pobre

Tamaño : Finos o mayores a 2"

Fluoruro de Ca: Menor a 50%

Oxido de Fe : Mayor a 2%

Plomo : Mayor a 0.10%

$\text{SiO}_2$  : Mayor a 5%

## ARRABIO PARA EL CUBILOTE

Grado: Especial de bajo Si, bajo Mn para Sorel metal y arrabios plateados de alto Si, son usados. El Sorel metal

es un metal especial de bajo Si y bajo Mn, se usa para controlar el contenido de Mn y Si en el fierro base para producir fundición nodular. El arrabio plateado debe usarse como la fuente de Si en la fusión en cubilote para una óptima recuperación y control del Si.

**Análisis:** Debe determinarse el contenido de Ti. En el fierro base no puede tolerarse un contenido residual de 0.07% o más.

#### CHATARRA DE ACERO

Muchos elementos perjudiciales están presentes en la chatarra de acero, por lo tanto, deben inspeccionarse cuidadosamente. A continuación se presentan diversos tipos de chatarras de acero:

- Acero estructural (ángulos, vigas, placas).- Es el mejor tipo de chatarra de acero. Usualmente, es un acero de bajo C con aproximadamente 0.04% máximo de P y de 0.40 a 0.60 %Mn. Normalmente contiene casi 0.05% máximo de Cr.
- Calderas y plancha naval.- Usualmente con alto %Mn (0.70% a 0.90%), sin embargo es una buena chatarra y prácticamente está libre de elementos nocivos.
- Fardos de acero.- Pueden usarse si son de análisis conocido, bajos en S, P y Cr.
- Rieles.- Es una buena chatarra para piezas de secciones gruesas y resistentes al desgaste. Usualmente, el rango de Mn es de 0.70% a 0.90%.
- Parachoque de autos, cubierta de ruedas, tapa cubos y marcos.- Son chatarras de muy mala calidad, para producir fundición nodular, debido a sus altos contenidos de Cr.
- Engranajes de automóvil.- Chatarra de mala calidad. Usualmente, los engranajes están aleados con Cr y Mo.
- Cigüeñales de automóvil (acero forjado o fundición nodular).- Pueden usarse a menos que estén fabricados de acero de fácil mecanizado.
- Muelles de automóvil.- Mala chatarra debido a la presencia de elementos formadores de carburos, Cr, Mo, V, etc.

- Aceros al plomo.- Deben evitarse.
- Barras de acero.- Normalmente se rechazan debido a que pueden ser de fácil mecanizado (resulfurizado o conteniendo Pb) o aceros aleados conteniendo Cr.

#### RETORNOS

Deben usarse en la carga solamente retornos de fundición nodular. Por lo tanto, ellos deben separarse completamente de la chatarra de fierro fundido. Por lo general, los retornos de fierro fundido son altos en P, Cr y Mn.

Los retornos deben estar libres de arena, por encima de las cantidades normales. La arena es ácida y contamina la práctica básica.

#### CHATARRA DE FIERRO FUNDIDO

Bajo condiciones normales no debe usarse en la práctica básica.

La chatarra comprada de fundición gris que incluyen monoblock, es una chatarra deficiente. Los monoblocks, usualmente, contienen alto P y Cr. Casi toda la chatarra de fundición gris contiene excesivo P. Los monoblocks desmontados deficientemente pueden introducir Pb y Al.

La chatarra de fundición maleable es deficiente, a causa de la presencia de B, Bi y P que pueden ser nocivos a la fundición nodular. Esta chatarra no es tan deficiente como la chatarra de fundición gris, para la producción de fundición nodular.

1) FUNDENTES EN LA CUCHARA.- Se usan algunos adecuados fundentes para reducir la escoria y prevenir que las películas de óxido de Mg ingresen a la cavidad del molde. Se ha encontrado que es efectiva una mezcla de fluoruro de Na y criolita. Las fundiciones, ahora, están empleando de 0.015% a 0.10% de esta mezcla, con buenos resultados. El fundente, usualmente, se añade en la balsa si es bastante grande, sin embargo, algo se añade en el fondo de la cuchara durante la post-inoculación.

La Tabla 4.4, presenta los datos de operación recomendables para un cubilote básico.

#### 4.4. CONTROLES DEL METAL FUNDIDO

a) COMPOSICION QUIMICA.- Desde el punto de vista del control químico, el cubilote básico es más complejo que un cubilote ácido. Su complejidad aumenta con la basicidad de la escoria. Variando la basicidad de la escoria se puede variar 3 elementos base (C, Si y S) sin cambiar drásticamente otras condiciones. Por ejemplo, la Tabla 4.5 describe que ocurre cuando se incrementa el fundente para elevar la basicidad.

TABLA 4.5.- MEZCLAS BASICAS VARIANDO LA BASICIDAD DE LA ESCORIA  
(Para producir un C final de 3.4% y 2 %Si)

Carga de fundente	Acero %	Pérdida de Si, %	Ganancia de C, %	S base %
Acido : 4% de caliza	30	15	0.45	0.090
Básico: sin fundente	35	20	0.65	0.075
1% caliza	40	24	0.85	0.070
2% caliza	50	27	1.25	0.060
4% caliza, 1/2% espato	60	30	1.60	0.050
4% caliza, 1% espato, 1% CaC <sub>2</sub>	80	30	2.40	0.030

Controlando la basicidad de la escoria y utilizando sólidos principios metalúrgicos para operar el cubilote, se puede controlar la composición química base a tolerancias estrechas.

b) CARBONO.- Para eliminar la segregación del grafito y la escoria de las piezas, el carbono equivalente final debe mantenerse entre 4.20% y 4.50%, dependiendo del tamaño de la sección y las propiedades deseadas. Debe usarse una composición eutéctica para la mayoría de piezas de secciones medianas y gruesas, mientras que debe usarse en partes de paredes delgadas una composición ligeramente hipereutéctica. El Si final puede controlarse con exactitud por adiciones en la cuchara. El contenido de C debe ser controlado en el cubilote, por la pesada correcta de todos los materiales de la carga y usando un buen control sobre la composición química de la escoria, entrada del aire, presión, propiedades del coque y humedad.

ESCORIA.- Un incremento en el fundente (caliza y espato) aumentará

la basicidad de la escoria y aumentará la ganancia de C. La caliza debe mantenerse en una cantidad que asegure un bajo S base, sin embargo, no producirá un inusual alto C. Esta cantidad, normalmente cae entre 5% y 7% para producir un contenido de S base de 0.02% a 0.03%. La altura del dique para escoria, que controla la profundidad de la escoria en el pozo, debe mantenerse a una profundidad suficiente para conservar 4" de escoria en el pozo. Esto permite disminuir el contenido de piedra caliza sin bajar el S base, en vista de que el fierro tendrá más tiempo para desulfurizarse a medida que este cae a través de un baño profundo de escoria.

La fórmula para calcular la altura del dique para escoria es la siguiente:

$$\text{Altura del dique} = \frac{P}{4} + \frac{X}{3}$$

P = Presión de la caja de viento.

X = Profundidad de la escoria en el pozo.

Para controlar adecuadamente la desulfurización en un cubilote básico, es necesario un sistema de canal de escoriado frontal.

Una escoria con aproximadamente 8 a 15% de  $Al_2O_3$ , 28 a 32% de  $SiO_2$ , 16 a 20% de MgO y 36 a 40% de CaO, se ha encontrado que tiene una buena eficiencia de desulfurización. Se está usando piedra dolomítica (aproximadamente 45 %  $MgCO_3$ ) en combinación con caliza, para obtener una escoria con la composición química antes mencionada.

Las escorias básicas son más viscosas que las escorias ácidas. A menudo se usa fluorita para añadirle fluidez a la escoria en el caso de que la temperatura del cubilote disminuya y la escoria se vuelva demasiado viscosa para fluir apropiadamente. Es una práctica normal el uso de 1 parte de espato a 6 partes de piedra caliza, sin embargo, a medida que la temperatura de sangrado aumenta durante la colada, puede reducirse el contenido de fluorita. Esto no variará el contenido de C en un grado significativo.

COQUE.- Para una mínima ganancia de C y máxima eficiencia, usar un tamaño de coque que tenga un diámetro aproximadamente de 1/12 del diámetro interno del cubilote.

**AIRE.-** La presión del aire debe ser mayor que la normal para reducir el C final. El volumen del aire debe mantenerse a casi 125% de la proporción normal (ver Tabla 4.4). Normalmente, las presiones estarán entre 18 y 30 onzas. La relación del área del cubilote al área total de las toberas, debe ser superior a 5:1 para una adecuada penetración. Son ventajosos los etalajes en las toberas o toberas sobresalidas.

**CARGA.-** El C de entrada debe mantenerse lo más bajo posible. Se recibe todo el retorno y se emplea acero para el balance. Es normal una carga de acero del 60%. La carga debe calcularse de acuerdo a sólidos principios metalúrgicos.

c) **AZUFRE.-** El S base debe mantenerse lo más bajo posible, dependiendo del C deseado y se mantendrá constante a fin de que se añada la cantidad adecuada de Mg. Un cuadro similar al siguiente puede usarse para estimar el S base a cualquier hora durante la operación:

<u>%S base</u>	<u>Color de la escoria</u>
0.06	Verde-negro brillante
0.05	Negro mate
0.04	Gris
0.03	Pardo
0.02	Blanco
0.01	Blanco desintegrable

A intervalos especificados durante una colada, tomar muestras de escoria. Se usará el color de la escoria para estimar la basicidad y el S base.

Debe hacerse ocasionalmente los análisis químicos de la escoria y registrarse la basicidad.

Cada fundición tendrá su propio control de color y especificación, en vista de que las condiciones de cada cubilote puede alterar ligeramente el color. El método de enfriamiento de la muestra de escoria, también puede variar el color y por lo tanto no debe cambiarse.

d) **SILICIO.-** La pérdida de Si varía dependiendo de la basicidad de la escoria. La pérdida normal es 30%, en operación medianamente básica (0.025 %S base). Para una máxima economía, minimizar la pérdida de Si, manteniéndose éste bajo en la carga. El Si base debe conser -

varse entre 0.60% a 0.80%, para obtener óptimos resultados.

e) MANGANESO.- Los problemas del control de S y el suficiente balance Mn/S, se eliminan en una operación básica. Hay poca pérdida de Mn en la operación básica y el Mn actúa como un aleante.

f) FOSFORO.- Ninguna desfosforización tiene lugar en una operación normal reductora.

g) CONTROL DE TEMPERATURA.- En general, la temperatura mínima de tratamiento es 1,370 °C, sin embargo, temperaturas de 1,510 °C o más, se consideran más conducentes para limpiar las piezas libre de defectos de escoria y pinholes.

#### 4.5. CALCULO PARA UNA COLADA DE FUNDICION NODULAR

a) CALCULO DEL COMBUSTIBLE.- Para una máxima eficiencia la carga de combustible debe estar entre 5 y 10 lbs. de coque por pie<sup>2</sup> del área del cubilote.

Ejemplo: Cubilote de 42"	9.62 x 7.5 = 72 lbs.
ó	9.62 x 10 = 96 lbs.

b) CALCULO DE LA CANTIDAD DE COQUE REQUERIDO PARA DESCOMPONER LA HUMEDAD DEL AIRE.- Este cálculo a menudo se pasa por alto en la operación del cubilote. Muchos productores aumentan la carga de coque en el verano o en días lluviosos, sin embargo, pocos realmente conocen cuanto se necesita de coque extra. Por ejemplo, en un día seco frío, 20% de humedad relativa y - 1 °C, sólo se requiere 4 lbs. de coque por ton. de carga, para la reacción agua-gas. Mientras que en un día húmedo caliente, 80% de humedad relativa y 32 °C, para descomponer la humedad en el aire, se requerirá 72 lbs. de coque. Por lo tanto, es muy importante para una buena operación en el cubilote, la adición de la cantidad exacta de coque para esta reacción.

La relación entre la humedad, velocidad del aire y las lbs. de coque por hora, se calcula con la siguiente expresión:

$$\frac{\text{lbs de coque}}{1,000 \text{ lbs de carga}} = \frac{0.0001 \times \text{pie}^3 \text{ de aire, hr,} \times \text{Granos de humedad (b de aire seco)}}{13 \times \text{Velocidad de fusión} \times 2}$$

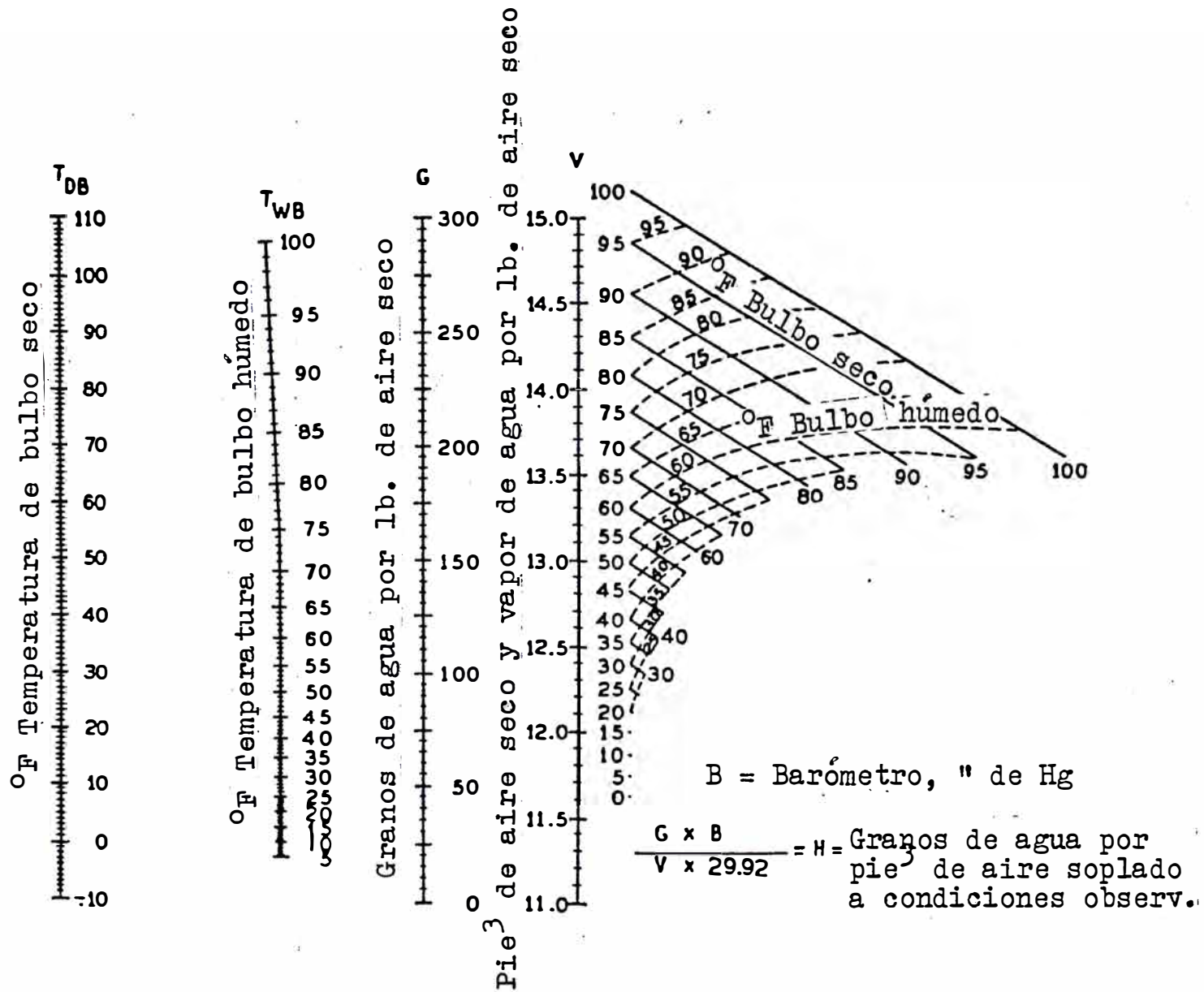


FIGURA 4.5.- Carta para determinar la humedad del aire soplado al cubilote.



De este modo, para un cubilote de 42", soplando aire a 3,900 pies<sup>3</sup>/min y una velocidad de fusión de 7 ton/hr, el peso del coque requerido por 1,000 lbs. de carga, para la reacción agua-gas, se calcula como sigue:

Condiciones:            Humedad Relativa = 60%  
                          Temperatura de bulbo seco =  $T_{DB} = 60 \text{ }^\circ\text{F}$   
                          Temperatura de bulbo húmedo =  $T_{WB} = 52 \text{ }^\circ\text{F}$

De la Figura 4.5, se obtiene:

$$\frac{\text{Granos de humedad}}{\text{lbs. de aire seco}} = 45$$

$$\frac{\text{lbs de coque}}{1,000 \text{ lbs de coque}} = \frac{0.000176 \times 3,900 \times 60 \times 45}{13 \times 7 \times 2} = 10.2 \text{ lbs}$$

c) CALCULO DE LA RELACION METAL/COMBUSTIBLE.- El combustible del cubilote, coque, desempeña 3 funciones principales, las cuales podemos llamar los factores "X", "Y", y "Z". El factor "X", es aquella porción del combustible que se combina con el oxígeno para generar calor para la fusión y sobrecalentamiento del fierro, la calcinación de la caliza, y la formación, fusión y sobrecalentamiento de la escoria, a una eficiencia específica del cubilote. Este factor depende de la eficiencia del cubilote y los materiales usados en la carga. El factor "X" debe determinarse para un cierto grupo de condiciones y luego puede ser usado con los factores "Y" y "Z" para determinar la relación metal/combustible.

El factor "Y" es la cantidad de coque requerido para suministrar C para la carburización.

El factor "Z" es la cantidad de coque necesario para descomponer la humedad en el aire soplado.

Para calcular la relación de metal a combustible en una colada, primero seleccionar 1,000 lbs. como la cantidad unitaria de metal para simplicidad del cálculo. El siguiente es un método de cálculo de la relación metal/combustible para la operación de un cubilote de 84" con una carga de acero de 55% y un C de entrada de 1.66%, 6% de piedra caliza y 1% de espato flúor, cuando el aire ingresa a una temperatura

de 60 °F y 60% de humedad relativa.

**CALCULO DE LA RELACION METAL A COMBUSTIBLE:**

**Coque requerido para  
1,000 lbs. de metal**

Factor "X": Para un cubilote de 84" a las condiciones anteriores **73 lbs.**

Factor "Y": C de entrada = 1.66%  
C de salida = 3.66%  
C ganado requerido = 2.00%

$\frac{C \text{ ganado}}{C.F. \text{ en el coque}} \times \text{carga metálica} = \frac{2.00}{0.91} \times 1,000 = 22 \text{ lbs.}$

Factor "Z": (Coque requerido para descomponer la humedad) **10 lbs.**  
Coque total requerido/1,000 lbs. de carga = **105 lbs.**

$$\text{Relación Metal/Combustible} = \frac{1,000}{105} = \frac{9.5}{1}$$

Si el coque usado es 385 lbs., la carga metálica total es:

$$385 \times 9.5 = 3,658 \text{ lbs.}$$

**d) CALCULOS PARA UNA COLADA DE FUNDICION NODULAR**

Diámetro interno del cubilote = 42"

Altura de cama seleccionada = 54"

Peso de coque usado para quemarse = 2,000 lbs.  
(estimado, debe conocerse el peso real)

- Caliza necesaria para neutralizar el material ácido en la cama de coque y producir una escoria de aproximadamente 1.5 de basicidad.

Ceniza de coque = 5.0%

La caliza tiene 54 %CaO y 0.25 %MgO

$$\frac{0.05 \times 2,000}{0.54 + \frac{2}{3} (0.0025)} \times 1.5 = 277 \text{ lbs. de caliza necesaria para mezclarse con } \frac{1}{3} \text{ superior de la cama.}$$

La fluorita se añade en una proporción de 1 a 5 de caliza, para bajar el punto de solidificación de la escoria, a fin de que pueda ser más fácilmente manipulada y prevenir la formación de puentes en la primera etapa de operación.

$$277 : 5 = 55 \text{ lbs. de fluorita mezclada con } \frac{1}{3} \text{ superior de la cama}$$

La reacción con los materiales del revestimiento puede requerir una ligera reducción en este cálculo.

- Carga de coque = 96 lbs. (10 lbs/pie<sup>2</sup> x 9.6 pie<sup>2</sup>)

- Carga metálica total = relación metal/combustible x carga de coque  
 = 6.5 x 96 = 624 lbs (ver Tabla 4.4, para la relación m/c = 6.5 a 1)

BALANCE DE CARGA

Material	CARGA		SILICIO		CARBONO	
	%	Peso (lbs)	Material	Carga	Material	Carga
Acero	55	343	0.20%	0.11%	0.20%	0.11%
Retorno	40	250	2.50%	1.00%	3.60%	1.44%
Arrabio plateado	5	<u>31</u>	9.60%	<u>0.48%</u>	2.10%	<u>0.11%</u>
	TOTAL	624 lbs		1.59%		1.66%
	Menos 35% de pérdida de Si			<u>0.56%</u>		
	Silicio base			1.03%		
	Más 0.85% NMSA N° 2			0.30%		
	Más 1.00% FeSi (85%) Inocul.			<u>0.85%</u>		
	Silicio final deseado			2.18%		
	Carbono final deseado					<u>3.66%</u>
	Ganancia de carbono deseado					2.00%

4.6. FUSION EN HORNO ELECTRICO DE ARCO DIRECTO

Se pueden producir fundiciones nodulares de calidad, a partir de fierros base fundidos en hornos de arco directo. Sin embargo, como en todos los métodos de fusión, deben observarse ciertas precauciones. Algunas de las cuales, son las siguientes:

- 1) Si coladas de fierros de alta aleación o aceros preceden a la colada de fundición nodular, puede necesitarse una colada de "lavado" para evitar la contaminación.
- 2) Los fierros fundidos en horno de arco eléctrico, son más sensibles a la influencia de cantidades residuales de elementos estabilizadores de carburos, que en los fierros fundidos en cubilote.
- 3) El nitrógeno e hidrógeno se introducen dentro del fierro, de la

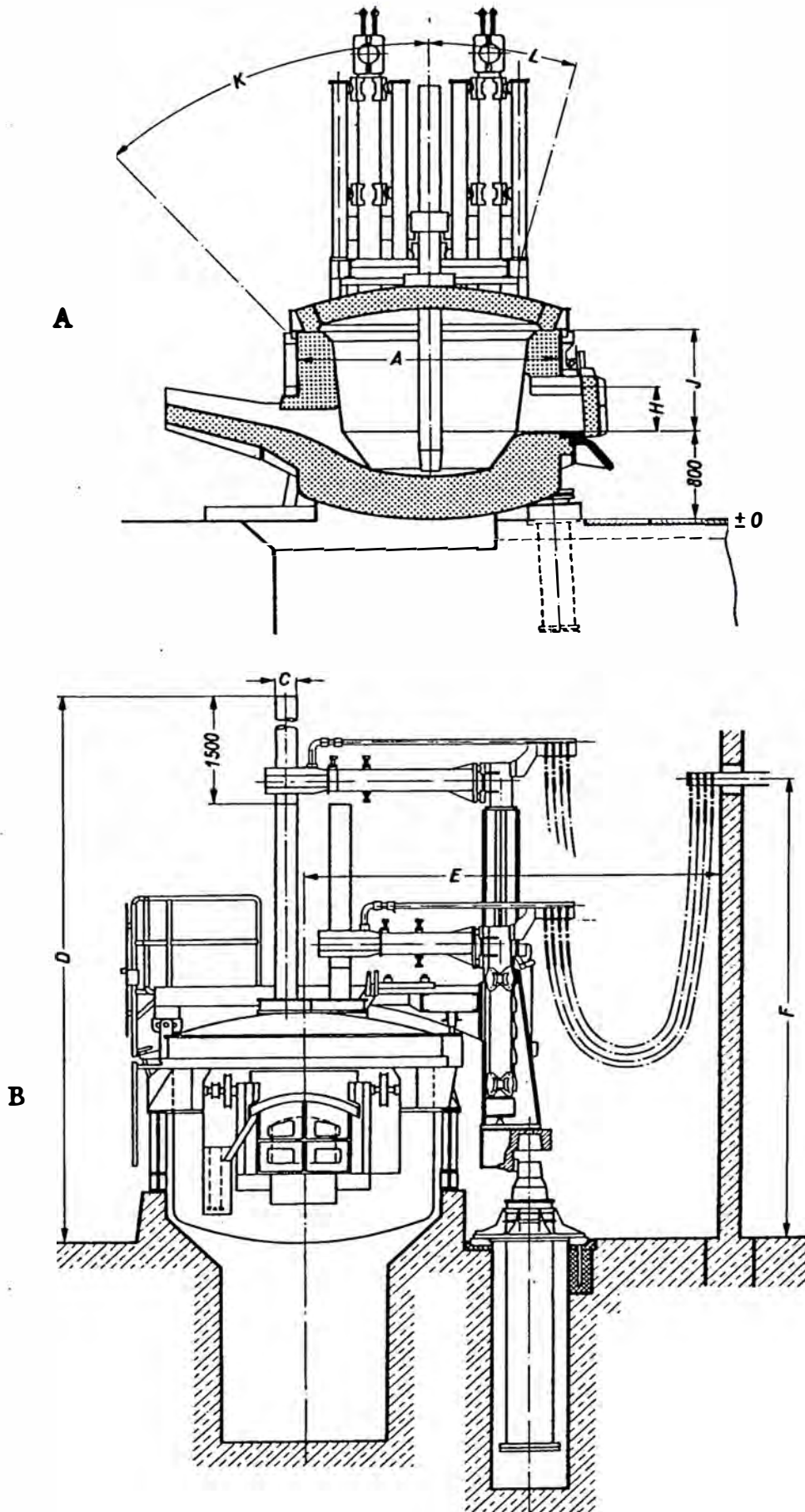


FIGURA 4:6.- Dibujo esquemático de un Horno Eléctrico de Arco.

disociación del aire y vapor de agua en la atmósfera del horno por el arco eléctrico. Esto tiende a incrementar el chill y las características de dureza del fierro hasta una cierta magnitud.

Los componentes de la carga determinan el análisis del fierro producido. Las pérdidas por oxidación son relativamente insignificantes a menos que sea inducido por la introducción de grandes cantidades de herrumbre y suciedades dentro de la carga del horno. Nada de S se introduce dentro de la carga, del combustible como es el caso de la fusión en cubilote. Se producen sin dificultad fierros base con niveles de S de 0.02% a 0.03% y responden fácilmente a la esferoidización.

El tipo de hornos de arco directo usado para la fusión de los fierros base para las fundiciones nodulares son, normalmente, hornos con revestimiento ácido del tipo presentado en la Figura 4.6.

Como se muestra en la Figura 4.6, un horno de arco directo es una forma de tazón revestido con refractario con 3 electrodos que pasan a través de la bóveda y suspendidos verticalmente a fin de tener el arco en serie. La corriente eléctrica pasa de un electrodo a través de la carga o baño y sale a través de los otros electrodos. Los electrodos son transportados sobre la estructura tal como se muestra y están espaciados en relación a cada uno de los otros, de modo que los arcos no se produzcan entre ellos. El hogar se inclina hacia un pico de vaciado. El horno completo está encerrado en un casco de acero, el cual a su vez está aislado del hogar del horno y revestido con refractario. El calentamiento ocurre por medio del arco entre los electrodos y la carga o la escoria y el baño metálico.

Los hornos modernos revestidos con refractario ácido instalados en los pasados 30 años, son del tipo de bóveda separable lo cual hace posible el cargado por arriba. Los hornos de arco usados para la fusión del fierro varían en tamaños de 1/4 a 65 ton. de capacidad. En la mayoría de casos los hornos se cargan con 1.3 a 2.2 veces su capacidad. Actualmente, la potencia alimentada de los hornos de arco están basados sobre 1,000 Kw por ton. de capacidad de fusión, para nuevas instalaciones. Realmente, solo casi 500 Kw se requieren para fundir una ton. de fierro, en un horno de arco directo.

a) REVESTIMIENTOS DEL HORNO.- El revestimiento en estos hornos es silí-

ceo o un refractario tipo ácido. Un revestimiento completo de un nuevo horno, consistirá de una capa de ladrillo refractario de servicio pesado, colocada próxima al casco. Estos se unen simultáneamente con un mortero de alta temperatura. Luego se colocan ladrillos sílice, de tal manera que ellos formen un "tazón" en la solera. Todos los ladrillos de sílice se colocan flojamente con arena sílice seca frotada dentro de los empalmes luego de cada marcha. Esta construcción constituye la parte inferior o solera para toda la vida y no se retira cuando el revestimiento del fondo o solera es apisonado para reemplazarse. La solera de trabajo en estos hornos varía de 4" a 8" en profundidad dependiendo del tamaño del horno. Esta capa consiste de un material húmedo apisonado el cual es una mezcla de arcilla refractaria calcinada y ganister. Una mezcla típica es 90% de sílice ganister, 5% de arcilla refractaria calcinada y 5% de agua.

Las paredes laterales se construyen comúnmente de ladrillos refractarios de servicio pesado o de sílice que dan un servicio satisfactorio cuando los hornos se operan continuamente. Cuando la operación es intermitente, como en el caso de una fundición, para minimizar el descascamiento se usa una mezcla super refractaria de arcilla refractaria calcinada - ganister apisonado sobre ladrillos refractarios de servicio pesado.

b) BOVEDAS.- En la mayoría de fundiciones las operaciones de fusión son intermitentes. Las bóvedas con ladrillo sílice no pueden utilizarse debido a las rajaduras y descascamiento que se producen durante el calentamiento y enfriamiento en operaciones intermitentes en el horno. Por esta razón, muchas fundiciones usan hornos con bóvedas construidas con ladrillos super refractarios de arcilla refractaria con alta alúmina o refractarios de alta alúmina apisonados. Se ha usado con éxito en hornos de arco de 1 y 2 ton. de capacidad, refractarios castables de alta alúmina.

c) ELECTRODOS.- Se usan electrodos de grafito en la mayoría de las operaciones de fundición. El costo extra se compensa por el bajo consumo y facilidad en el manipuleo. Los tamaños de electrodos, comúnmente, más utilizados en las fundiciones son electrodos de grafito de 4", 6" y 8" de diámetro. En la fusión del fierro fundido, el consumo

de electrodo puede variar de 5 a 12 lbs. de carbón por ton. neta de metal cargado, dependiendo de la conservación del metal líquido y lo largo de las coladas. Un promedio del consumo de carbón para fundir hierro fundido, usualmente, cae en el rango de 9 lbs. de carbón por ton. de metal cargado.

d) PRACTICA DE FUSION DEL FIERRO BASE.- La fusión de los fierros fundidos en hornos de arco directo es un procedimiento de fusión en baño, relativamente, no complicado. Si se usa una carga consistente de arrabio o Sorel metal, retornos y chatarra de fundición, la carga se coloca en el horno, se funde lo más rápidamente posible para producir la temperatura de vaciado requerida de 1,480 °C a 1,540 °C. En este momento el metal es ensayado, la escoria es escoriada y el metal vaciado del horno a la cuchara. Si la escoria sobre la superficie del metal en el horno, es demasiado fluida para escoriarse, se desparrama arena sílice sobre la escoria para espesarla y hacerla separable.

Cuando las cargas consistentes de retornos, chatarra de acero, aditivos de C y carburo de Si, son fundidos para producir un hierro fundido sintético, se usa el siguiente procedimiento:

- 1) Los aditivos de C y carburo de Si, son colocados en el fondo del horno.
- 2) La parte de acero de la carga metálica se coloca sobre los aditivos de C y carburo de Si.
- 3) Los canales o retornos de fundición forman la parte final de la carga, la cual se coloca encima de la carga de acero.
- 4) La carga se funde hasta aproximadamente 1,540 °C y se analiza para determinar su composición química.
- 5) En este momento el horno es escoriado y si se requiere se hacen las adiciones de C en la forma de gradito sintético o Si en la forma de arrabio plateado. Luego el metal es sangrado.

Cuando se producen fierros sintéticos en un horno de arco, es necesario sobrecalentar el metal a temperaturas en el rango de 1,540 °C, para que el C en los aditivos de C y el Si y C en el carburo de Si, puedan ser absorbidos por el metal fundido. En un horno de arco, aproxima-

damente de 80% a 85% del C añadido puede ser absorbido por el fierro. En el caso del carburo de Si, más del 95% del Si es tomado por el fierro y casi 70% del C.

#### 4.7. FUSION EN HORNO ELECTRICO BASICO DE ARCO DIRECTO

Los fierros base para la fundición nodular pueden fundirse satisfactoriamente en hornos de arco revestidos con refractarios básicos. Cuando se usa una escoria básica reductora en una práctica de fusión similar a aquella descrita en la fusión con horno de arco con revestimiento ácido, el contenido de S de los fierros base puede reducirse a valores tan bajos como 0.004%. Sin embargo, debido al tiempo de colada requerido y los problemas en la manipulación de la escoria, la fusión básica se emplea muy raramente en la producción de fundición nodular.

#### 4.8. FUSION EN HORNO ELECTRICO DE ARCO INDIRECTO

El horno de arco indirecto u horno de arco oscilante fue desarrollado originalmente para la fusión no ferrosa y, generalmente, no es adecuado para la fusión del acero, sin embargo, se usa sobre una base limitada para la fusión de pequeñas coladas de fierro fundido, de hasta 1,500 lbs. Estos hornos consisten en, esencialmente, de un cilindro revestido con refractario y 2 electrodos de grafito insertados dentro del cilindro, en el centro sobre los extremos. El arco entre los 2 electrodos genera el calor requerido para la fusión. Estos hornos cuando están en operación, después de la carga cuando el metal se funde parcialmente oscila hacia atrás y hacia adelante a través de un ángulo de casi 120°. Esto se hace con el propósito de tomar ventaja del calor almacenado en el revestimiento, así como del calor reflejado. Las características de operación de los hornos oscilantes de arco, cuando se usan para la fusión del fierro fundido, son las siguientes:

- Potencia promedio por ton. de fierro fundido, 650 a 680 Kw.
- Grafito promedio requerido por ton. de fierro, 8 a 11 lbs.
- Temperatura promedio del fierro fundido, 1,540 °C.
- Intervalo típico de colada, 1 1/4 horas.
- Coladas de fierro fundido por revestimiento del horno, 50.

Los hornos de arco indirecto tienen serios problemas de oxidación



TABLA 4.6.- BALANCE DE CARGA PARA OBTENER EL FIERRO BASE DE UNA FUNDICION  
NODULAR FERRITICA EN BRUTO DE COLADA

Material cargado Tipo	% %	% Silicio		% Carbono		% Manganeso		% Azufre		% Fósforo		% Níquel	
		Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga
Retornos	42.00	2.60	1.09	3.70	1.55	0.230	0.096	0.008	0.002	0.030	0.012	0.110	0.046
Sorel metal	30.00	0.09	0.03	4.25	1.27	0.010	0.003	0.020	0.006	0.022	0.006	0.080	0.024
Chatarra de acero	27.07	0.20	0.05	0.20	0.05	0.600	0.163	0.020	0.005	0.030	0.008	0.050	0.013
Milco N° 4	0.93	--	--	98.50	0.91	--	--	0.280	0.003	--	--	--	--
Totales	100.00		1.17		3.78		0.202		0.016		0.026		0.043

TABLA 4.7.- BALANCE DE CARGA PARA OBTENER EL FIERRO BASE DE UNA FUNDICION  
NODULAR FERRITICA EN BRUTO DE COLADA

Material cargado Tipo	% %	% Silicio		% Carbono		% Manganeso		% Azufre		% Fósforo		% Níquel	
		Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga
Retornos	40.00	2.60	1.04	3.70	1.48	0.250	0.100	0.010	0.004	0.030	0.012	0.100	0.040
Sorel metal	40.00	0.10	0.04	4.25	1.70	0.050	0.020	0.020	0.008	0.030	0.012	0.100	0.040
Chatarra de acero	19.049	0.20	0.04	0.20	0.04	0.700	0.130	0.020	0.004	0.040	0.004	--	--
Carburo de silicio	0.166	60.00	0.10	30.00	0.05	--	--	--	--	--	--	--	--
Milco N° 4	0.785	--	--	98.50	0.62	--	--	0.280	0.002	--	--	--	--
				80% Rec.									
Totales	100.00		1.22		3.89		0.250		0.018		0.028		0.080

TABLA 4.8.- BALANCE DE CARGA PARA OBTENER EL FIERRO BASE DE UNA FUNDICION  
NODULAR PERLITICA EN BRUTO DE COLADA

Material cargado Tipo	%	% Silicio		% Carbono		% Manganeso		% Azufre		% Fósforo		% Níquel	
		Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga
Retornos	40.00	2.60	1.04	3.70	1.48	0.550	0.220	0.009	0.003	0.030	0.012	0.120	0.050
Chatarra de acero	57.49	0.20	0.11	0.25	0.14	0.600	0.340	0.020	0.011	0.030	0.017	0.060	0.030
Milco Nº 4 96% C	2.31	--	--	98.50	2.27	--	--	0.280	0.006	--	--	--	--
Carburo de Si - 90%	0.20	60.00	0.12	30.00	0.06	--	--	--	--	--	--	--	--
Totales	100.00		1.27		3.95		0.560		0.020		0.029		0.080

TABLA 4.9.- BALANCE DE CARGA PARA OBTENER EL FIERRO BASE DE UNA FUNDICION  
NODULAR PERLITICA EN BRUTO DE COLADA

Material cargado Tipo	%	% Silicio		% Carbono		% Manganeso		% Azufre		% Fósforo		% Níquel	
		Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga
Retornos	40.00	2.60	1.04	3.70	1.48	0.500	0.200	0.010	0.004	0.030	0.012	0.100	0.040
Chatarra de acero	57.01	0.10	0.06	0.20	0.11	0.650	0.370	0.030	0.017	0.030	0.017	0.100	0.060
Carburo de silicio	0.33	60.00	0.20	30.00	0.08	--	--	--	--	--	--	--	--
Milco Nº 4	2.66			80% Rec. 98.50	2.09	--	--	0.280	0.005	--	--	--	--
Totales	100.00		1.30		3.76		0.570		0.026		0.029		0.100

ción relacionados con su operación. Las pérdidas de Si, C y Mn, son tales que cargas altas en arrabio junto con aditivos de C se requieren para producir satisfactorios fierros base para la producción de fundición nodular. Una carga típica del horno es la siguiente:

<u>Material</u>	<u>%</u>
Fund. nodular, refundido	40
Sorel metal	47
Arrabio plateado (22 %Si)	2
Milco N° 4	1

A fin de minimizar la formación de carburos, la fusión y el tiempo de sobrecalentamiento debe hacerse sin retardo y la colada debe efectuarse tan pronto se haya alcanzado la temperatura de vaciado.

#### 4.9. FUSION EN HORNO DE INDUCCION DE FRECUENCIA DE LINEA SIN NUCLEO

En la actualidad, muchos productores de fundición nodular emplean la fusión por inducción para producir los fierros base que luego serán tratados con Mg. Los hornos de inducción proporcionan unas condiciones de fusión rápida, quieta, sin humo y limpia, sin la influencia adversa de la composición del combustible. Estos hornos hacen posible un control muy estrecho de la composición del metal.

Todos los hornos de inducción operan sobre el principio simple y familiar, que cuando una corriente alterna pasa a través de un espiral, se crea un campo magnético que induce corrientes parásitas en el metal colocado dentro del campo. Estas corrientes inducidas producen una resistencia en el metal y originan la subida de la temperatura. El grado de calentamiento alcanzado depende de la velocidad de variación o frecuencia del campo magnético y de su intensidad. En vista de que la frecuencia de línea fija la primera variable en 60 ciclos por segundo, la intensidad del campo se convierte en la variable útil.

El proceso de inducción trabaja solamente con metales, ningún calor es inducido en el crisol de refractario o revestimiento, en vista de que no es un conductor eléctrico. La temperatura límite del horno está determinada solamente por el punto de ablandamiento o refractoriedad del material del revestimiento.

Por ejemplo, un revestimiento de sílice apisonada soportará u

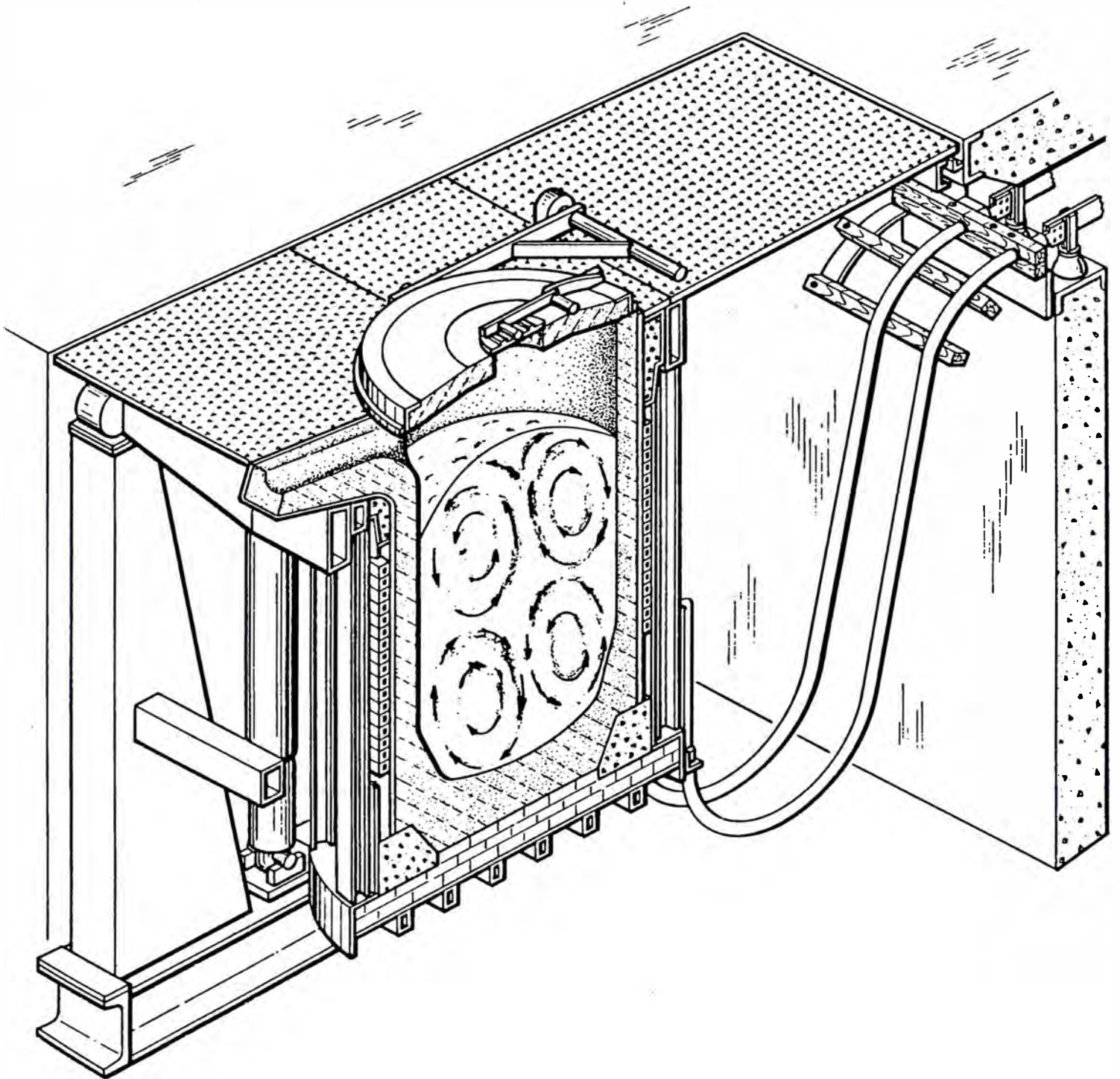


FIGURA 4.7.- Típica sección transversal de un Horno de Inducción, sin núcleo.

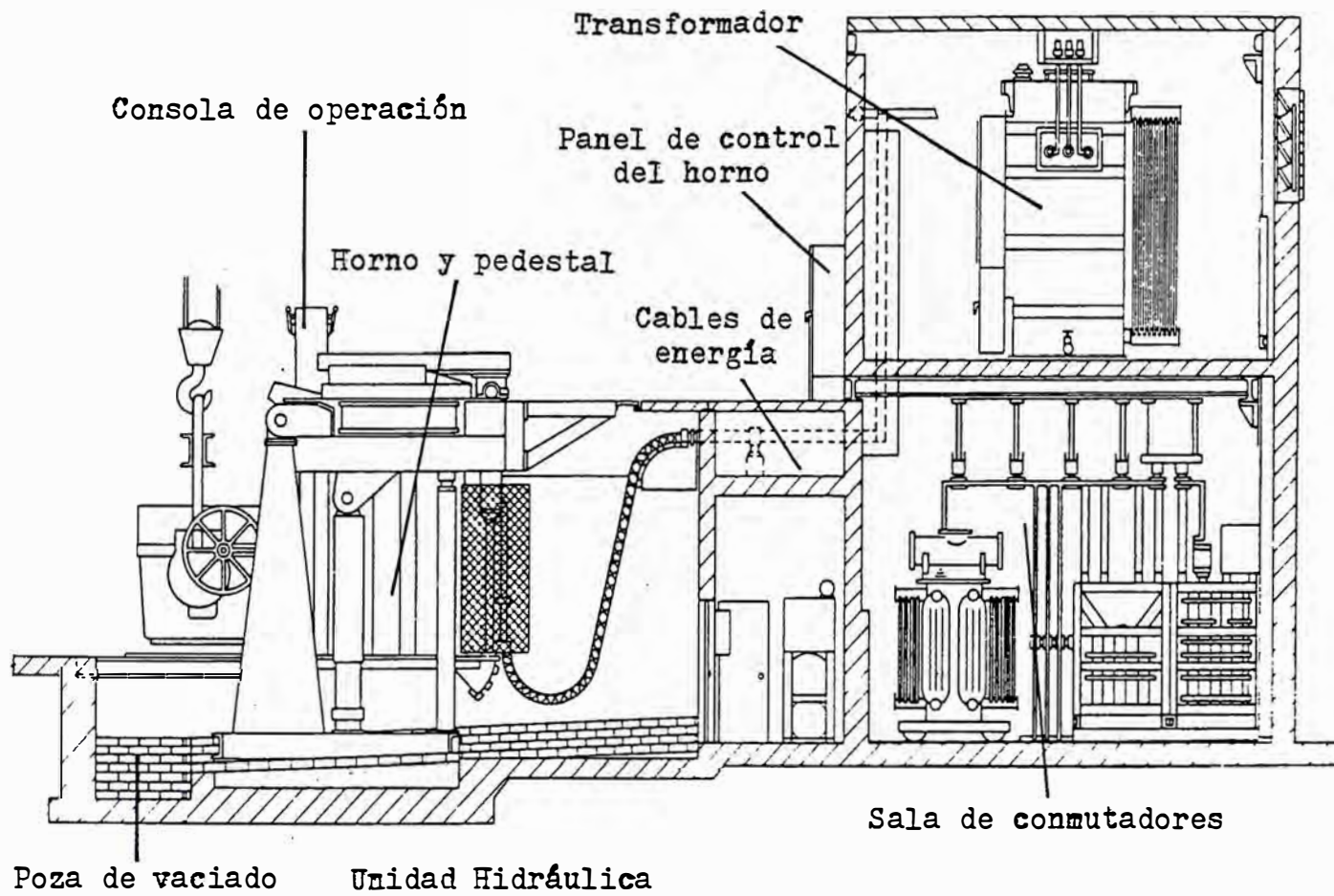


FIGURA 4.8.- Disposición de la instalación de un Horno de Inducción sin Núcleo.

na operación continua a 1,620 °C y un servicio intermitente a mayores temperaturas. Otros materiales de revestimiento tales como alta alúmina o magnesita soportarán temperaturas considerablemente mayores.

Estos conceptos se incorporan en diversos diseños diferentes de hornos de inducción. Para aplicaciones de fusión de fierro, el más versátil y práctico es el tipo de crisol o sin núcleo, en el cual la espiral de inducción induce la corriente dentro de toda la carga. Las Figuras 4.7 y 4.8, presentan diagramas de instalaciones de hornos de inducción sin núcleo.

Los requerimientos de potencia eléctrica para fundir fierro fundido frío, en hornos de inducción de frecuencia de línea sin núcleo, están en el orden de 500 Kw para temperaturas de metal de 1,540 °C. Si se usan equipos de precalentamiento y se calientan las cargas a aproximadamente 538 °C, los requerimientos de energía para la fusión caen en el rango de 380 a 400 Kw; y con precalentamiento a 650 °C se ha reportado un requerimiento de energía de 365 Kw por ton. neta.

Una característica especial de estos hornos, es la agitación que tiene lugar en el baño. Esto se ilustra esquemáticamente en la Figura 4.7. La acción de agitación se produce por el campo electromagnético y su intensidad se controla por la cantidad de energía que se está suministrando. Esta característica del horno se presta por sí mismo a la producción de fierros especiales que requieren gran cantidad de aleantes y para la preparación de fierros fundidos sintéticos de cargas consistentes de retornos, chatarra de acero, carburo de Si y aditivos de C. Este tipo de fierro base se ha usado satisfactoriamente en la producción de fundición nodular. El hecho que se puedan producir fácilmente fierros base con contenidos de C hasta 4.30% y contenidos de S inferiores a 0.025%, hacen particularmente apropiados estos hornos para la producción de fundición nodular. Las Tablas 4.10 y 4.11, son ejemplos de cargas en el horno que pueden usarse para producir fierros base para fundición nodular.

Estos hornos operan más económicamente cuando la carga se añade a un baño fundido. El volumen de metal líquido que debe retenerse en el horno será aproximadamente el 30% de la capacidad de retención. La carga debe añadirse a un baño relativamente libre de escoria en la si -

TABLA 4.10.- BALANCE DE CARGA EN UN HORNO DE INDUCCION SIN NUCLEO, PARA OBTENER EL FIERRO BASE DE UNA FUNDICION NODULAR PERLITICA EN BRUTO DE COLADA

Material cargado Tipo	%	% Silicio		% Carbono		% Manganeso		% Azufre		% Fósforo		% Níquel	
		Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga
Retornos	40.00	2.60	1.04	3.70	1.48	0.550	0.220	0.009	0.003	0.030	0.012	0.120	0.050
Chatarra de acero	57.49	0.20	0.11	0.25	0.14	0.600	0.340	0.020	0.010	0.030	0.017	0.060	0.030
Milco N° 4 96% C	2.31	--	--	98.50	2.27	--	--	0.210	0.005	--	--	--	--
Carburo de Si - 90%	0.20	60.00	0.12	30.00	0.06	--	--	--	--	--	--	--	--
Totales	100.00		1.27		3.95		0.560		0.018		0.029		0.080

TABLA 4.11.- BALANCE DE CARGA EN UN HORNO DE INDUCCION SIN NUCLEO, PARA OBTENER EL FIERRO BASE DE UNA FUNDICION NODULAR FERRITICA EN BRUTO DE COLADA

Material cargado Tipo	%	% Silicio		% Carbono		% Manganeso		% Azufre		% Fósforo		% Níquel	
		Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga
Retornos	42.00	2.60	1.09	3.70	1.54	0.230	0.096	0.008	0.002	0.030	0.012	0.110	0.046
Sorel metal	30.00	0.09	0.03	4.25	1.27	0.010	0.003	0.020	0.006	0.022	0.006	0.080	0.024
Chatarra de acero	27.07	0.20	0.05	0.20	0.05	0.600	0.163	0.020	0.005	0.030	0.008	0.050	0.013
Milco N° 4	0.93	--	--	98.50	0.91	--	--	0.200	0.008	--	--	--	--
Totales	100.00		1.17		3.77		0.262		0.021		0.026		0.083

guiente secuencia:

- 1) Los aditivos de C y carburo de Si, se colocan dentro del horno sobre la superficie del metal fundido.
- 2) La chatarra de acero se coloca en la cuchara de cargado, para que esta carga caiga sobre los aditivos de C y carburo de Si.
- 3) Los retornos de fundición nodular y los materiales de la carga, son colocados en la cuchara de cargado para que este material caiga sobre parte de la carga de chatarra de acero y el baño final.

Cuando se usa este procedimiento, debido a la acción agitadora del horno, como se presenta en la Figura 4.7, se obtienen de los aditivos de C, recuperaciones de 95%. Bajo estas condiciones es, también, posible que la mayor parte, si no en la totalidad, de Si y C en el carburo de Si se combinan con el fierro. Cuando el carburo de Si se usa bajo estas condiciones, se convierte en la fuente disponible de Si más económica.

Este tipo de horno de inducción puede comenzar con una carga fría. La carga debe consistir de 15% a 20% de bloques de arranque. Estos son discos sólidos de fierro de aproximadamente 10" de espesor y 3" o 4" menos que el diámetro del horno. Los bloques de arranque se colocan en el fondo del horno y luego se usan retornos y chatarras livianas para llenar el resto del horno. Un horno llenado con arrabio colocado estrechamente, puede también comenzar en frío. Sin embargo, cuando un horno comienza con una carga fría, se requiere una cantidad excesiva de energía eléctrica. Por lo tanto, se aconseja operar con un baño líquido continuamente, que nunca se dejará a menos del 30% de la capacidad total de retención del horno. Es por ello, que estos hornos deben mantenerse en operación durante toda la semana. Sin embargo, es aconsejable una parada cada fin de semana, para inspección y reparación. Con una adecuada reparación cada fin de semana, la vida promedio del revestimiento del horno es de aproximadamente 6 meses.

Para la fusión del fierro fundido en estos hornos, el material del revestimiento más recomendable que ha sido probado, es el refractario ácido de cuarcita que consiste de 99 %SiO<sub>2</sub> mezclado con 0.5 a 2.4% de ácido bórico apisonado in situ detrás de una placa metálica con



forma de crisol y sinterizado. La cantidad de ácido bórico usado depende del punto de fusión del revestimiento. La durabilidad del crisol del horno depende de la sinterización realizada adecuadamente y la cantidad de herrumbre presente en la carga metálica. Los requerimientos del material del revestimiento son de 2 lbs a 5 lbs por ton. de fierro fundido a 1,540 °C. El material del revestimiento consumido en la fusión, se combina con el óxido de Fe en el fierro fundido que proviene del herrumbre de la chatarra y retornos. Produciéndose la formación de silicato de Fe o fayalita ( $Fe_2SiO_4$ ).

Parte del silicato de Fe flota como escoria, la cual es esco-riada de la superficie del fierro fundido justo antes del vaciado del horno. La otra parte del silicato de Fe forma una estructura sobre las paredes del horno, en el área sin uso del baño fundido entre las superficies superior e inferior del espiral. Este problema, sin embargo, puede superarse con el uso de carburo de Si (Ferrocarbo en granos) como una parte de la carga del horno. El carburo de Si reduce el silicato de Fe a fierro metálico y sílice. Una adición de carburo de Si de aproximadamente 10 lbs. por ton., satisficará este requerimiento.

#### 4.10. FUSION EN HORNO DE INDUCCION DEL TIPO DE CANAL

El uso de los hornos de inducción de canal en las fundiciones de fierro se ha incrementado en los últimos años. Los hornos de tipo cilíndrico o de tambor, se usan principalmente como conservadores, para almacenar, como receptores y dispositivos de vaciado. Los hornos de canal vertical, se usan para fundir grandes volúmenes de fierro a relativamente bajas velocidades de fusión hasta 3.5 tons. por hora, usando la potencia suministrada durante las horas de menor carga. A menudo, estos hornos se usan para coleccionar grandes cantidades de metal para vaciar piezas de varias toneladas o para vaciar una serie de piezas en un intervalo dado de tiempo. La potencia alimentada se ha incrementado de 800 Kw en 1,972 hasta 1,800 Kw. Aún con este aumento en la potencia, las velocidades de fusión pueden solamente aumentarse por encima de 3.5 tons. por hora, añadiéndole inductores adicionales cada uno con un sistema eléctrico separado. Los principios de operación son similares a aquellos descritos previamente. Sin embargo, debido al hecho de que el calentamiento se hace en canales como se muestra en las Figuras 4.9 y

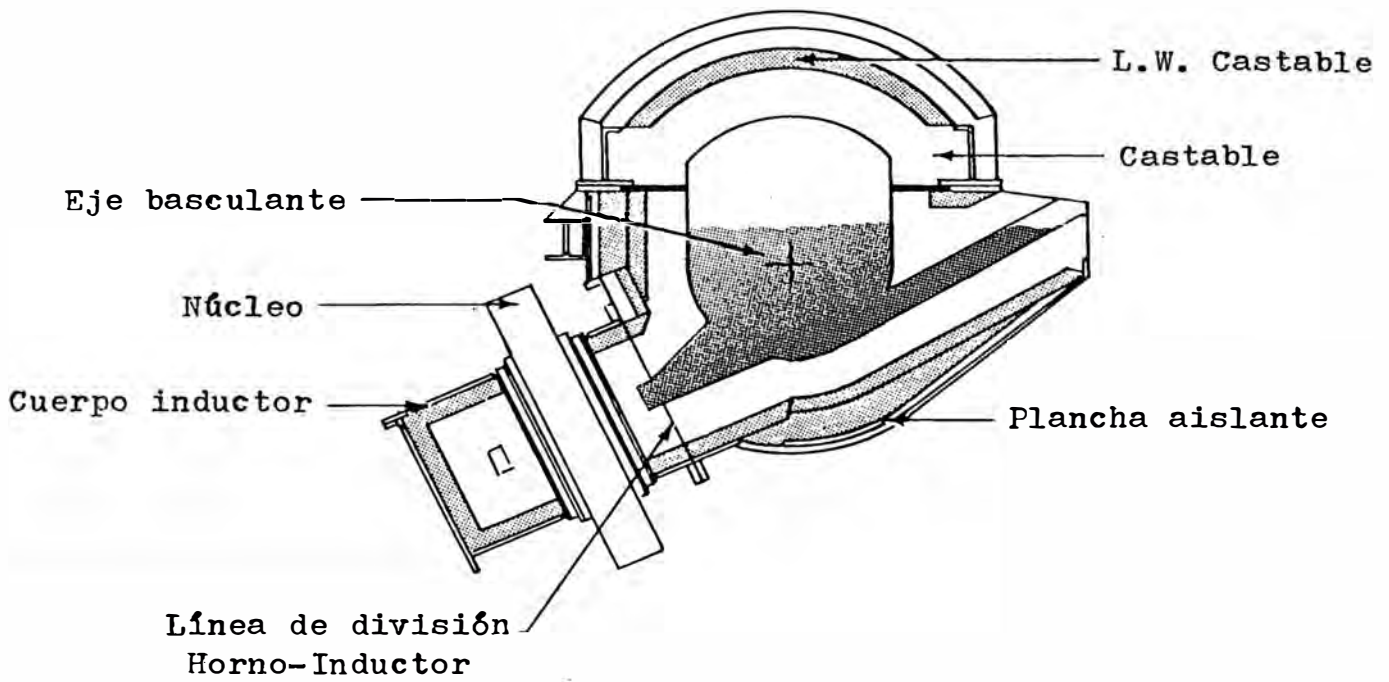


FIGURA 4.9.- Horno de Inducción cilíndrico de canal.

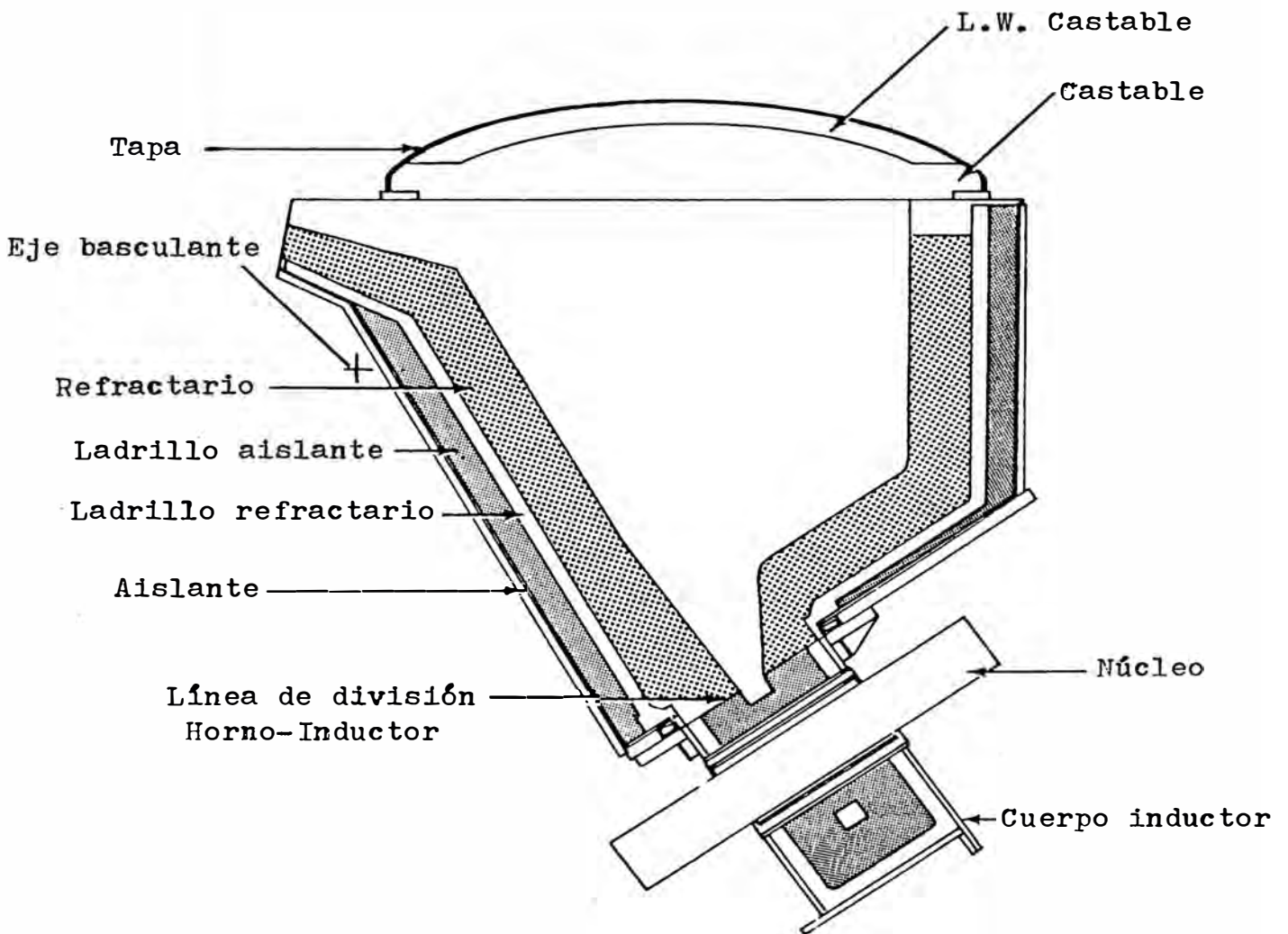


FIGURA 4.10.- Sección transversal de un Horno de Inducción vertical de canal.

4.10, toda la fusión y el metal sobrecalentado en los canales es bombeado dentro del crisol del horno. Por esta razón, las temperaturas del metal en los canales, a menudo están a más de 1,760 °C, particularmente, si se está fundiendo una carga fría. Como resultado de ello, la vida del inductor puede ser relativamente corta. Los requerimientos de energía para incrementar 56 °C 1 ton. de fierro fundido, es aproximadamente 15 Kw, dependiendo de las pérdidas de calor en el horno. Los requerimientos para conservación varía de 25 Kw por ton. por hora a 5 Kw por ton. por hora para hornos muy grandes.

El tamaño de los hornos de canal, es de casi 3 tons. de capacidad de retención hasta 100 tons. La capacidad de trabajo, es aproximadamente  $\frac{2}{3}$  de la capacidad de retención. La capacidad de fusión varía de 30% de la capacidad de retención para hornos con una capacidad de retención de 3 tons., hasta 10% en hornos con capacidades de retención de 30 tons.

Los hornos de canal no pueden comenzar en frío. Debe usarse metal fundido. Suficiente metal caliente debe añadirse para llenar los canales y casi el 20% de la capacidad de retención del horno. Si el metal solidifica en un horno de canal debido a una falla en la energía, se requerirá desmontar el horno.

Los hornos de canal se revisten con refractario de alta alúmina apisonado. Los inductores se revisten con un refractario fundido de alta alúmina o un refractario de magnesita. Los revestimientos del horno, generalmente, duran de 8 a 20 meses. Luego, se requiere un reemplazo total. Los inductores duran de 3 a 6 meses y pueden reemplazarse sin el requerimiento de serias reparaciones del crisol de retención de metal.

Como una regla general, se usan en la carga materiales metálicos. Mientras que, pueden emplearse materiales no metálicos, tales como los aditivos de C, pero sus recuperaciones son pobres. Esto se debe a la ausencia de la acción agitadora en el horno. El tiempo requerido por estos materiales para combinarse con el metal, es prolongado. Pueden esperarse recuperaciones del orden de 50% a 70%, en los aditivos de C, dependiendo del tiempo en el horno y la cantidad de movimiento de metal en el horno.

TABLA 4.12.- BALANCE DE CARGA EN UN HORNO DE INDUCCION DE CANAL, PARA OBTENER EL FIERRO BASE DE UNA FUNDICION NODULAR PERLITICA EN BRUTO DE COLADA

Material cargado Tipo	% Carga	% Silicio		% Carbono		% Manganeso		% Azufre		% Fósforo		% Níquel	
		Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga	Mat.	Carga
Retornos	30.00	2.40	0.72	3.65	1.09	0.600	0.180	0.010	0.003	0.030	0.009	0.200	0.060
Sorel metal	30.00	0.05	0.02	4.30	1.29	0.010	0.003	0.010	0.003	0.030	0.009	--	--
Arrabio	30.00	2.00	0.60	4.20	1.26	0.800	0.240	0.023	0.007	0.083	0.025	--	--
Chatarra de acero	10.00	0.20	0.02	0.20	0.02	0.600	0.060	0.040	0.004	0.012	0.001	0.150	0.015
Totales	100.00		1.36		3.66		0.483		0.017		0.044		0.075

Los hornos de canal vertical, que tienen un crisol de retención de metal, que es un cilindro vertical profundo, son sellados y usados para el tratamiento con Mg de la fundición nodular, por largos períodos. Además, los hornos de canal vertical pueden usarse como dispositivos de vaciado a presión.

#### 4.11. FUSION EN HORNOS DE REVERBERO

Los hornos de reverbero se usan en una cantidad limitada para la fusión de los fierros base para la producción de fundición nodular. Usualmente, las coladas producidas con estos hornos no exceden las 5 toneladas y, normalmente, están en el rango de 1 a 2 tons.

Los fierros base fundidos en hornos de reverbero, por lo general, requieren de alguna forma de pretratamiento para contrarrestar la influencia de los óxidos.

#### 4.12. PROCESO DUPLEX

El proceso Duplex se emplea por muchos productores de fundición nodular. El metal del cubilote, horno de arco y hornos de inducción sin núcleo, a menudo se hace duplex con hornos de inducción de canal (de conservación), con el propósito de almacenarlo. El hierro desulfurizado, pretratado y tratado con Mg se conserva en el horno de canal, por largos períodos de tiempo. El uso del proceso Duplex u hornos de conservación, hacen posible un suministro continuo de metal de las unidades de fusión del tipo baño, tales como los hornos eléctricos de arco.

C A P I T U L O   V   .- SELECCION DE LOS MATERIALES DE LA CARGA

El control de los elementos comunes, los elementos aleantes y los efectos de los elementos perjudiciales, se revisaron en el Capítulo III. Con este conocimiento se torna más obvio que todos los materiales de la carga y del tratamiento, deben ser de análisis químico conocido, tanto de los elementos comunes y de los menos comunes. Además, debe admitirse la posible contaminación de los revestimientos del horno y cuchara o del combustible. El método de fusión empleado determina en gran medida la selección de los materiales de la carga.

### 5.1. SOREL METAL

El Sorel metal es la base ideal para la fabricación del hierro base para la fundición nodular. Más del 80% de los productores de fundición nodular, reconocen que el Sorel metal es el único metal virgen que efectivamente diluye todos los elementos subversivos o perjudiciales tanto como Si, P y Mn económicamente. El muy alto grado de pureza de este material puede ilustrarse mejor, comparando los análisis del Sorel metal con los otros materiales especiales seleccionados para la producción de fundición nodular, presentado en la Tabla 5.1.

TABLA 5.1.- ANALISIS TIPICOS

	Sorel metal	Arrabios de bajo P		
Carbono	4.10	4.25	4.20	4.15
Silicio	0.18	1.35	1.16	1.90
Azufre	0.015	0.010	0.006	0.012
Fósforo	0.025	0.035	0.028	0.026
Manganeso	0.009	0.12	0.11	0.16
Trazas de elementos aleantes				
Níquel	0.080	0.030	0.030	0.042
Cobre	0.030	0.010	0.028	0.019
Elementos promotores de grafito				
Titanio	0.028	0.030	0.050	0.042
Aluminio	0.005	0.001	0.002	0.005
Elementos formadores de carburos y perlita				
Cromo	0.028	0.030	0.030	0.025
Vanadio	0.020	0.020	0.015	0.023

El Sorel metal es un hierro con bajo Si y bajo Mn. Su bajo % de Mn y su alta pureza o ausencia de cantidades significativas de elementos perjudiciales, lo hacen idealmente adecuado como un material de

carga para la producción de fundición nodular.

El bajo contenido de Si del Sorel metal permite el uso de todos los retornos generados. Esto permite la selección de las aleaciones de tratamiento más económicas y una adecuada inoculación de ferrosilicio sin excederse de los niveles deseados de Si final.

El extremadamente bajo contenido de Mn facilita la producción de fundición nodular en "bruto de colada" en el rango total de espesores de sección, eliminando los carburos segregados en piezas de sección gruesa, minimizando los carburos masivos en tuberías torneadas y reduce la tendencia a los pinholes. El bajo contenido de S permite la producción de fundición nodular con adiciones de bajo Mg y minimiza el chatareo de las piezas debido a la presencia de elementos perjudiciales.

Existe una razón por la cual se obtiene este alto grado de pureza. Verdaderamente, el proceso de fusión es sustancialmente diferente de la reducción en el alto horno. El mineral es minado en la región del Lago Allard en Quebec y es principalmente ilmenita con hematita finamente dispersa en una proporción aproximada de 2 a 1.

Este mineral es calcinado y fundido en grandes hornos abiertos de arco eléctrico. Cada colada de estos hornos es desulfurizado y el C se ajusta a un nivel constante. Esto hace posible la producción de un fierro con C y niveles de S controlados, no posibles en arrabios de alto horno. Además, los elementos estabilizadores de carburos presentes en el fierro están en la forma de óxidos y actúan como núcleos para incrementar la cantidad de nódulos en la fundición nodular.

## 5.2. RETORNO DE FUNDICION NODULAR

Si se produce más de un grado de fundición nodular con cambio en la composición, los canales deben pintarse para su identificación y clasificación. Los retornos de fundición nodular, son materia prima de calidad.

## 5.3. CHATARRA DE ACERO

Los departamentos de metalurgia y de compras, deben estar constantemente enterados de que elementos perjudiciales pueden introdu-



cirse con la chatarra de acero. Cromo residual en "Acero Auto Grado" es tá en el rango de 0.12 a 0.15%, cobre a 0.16%, etc. La contaminación con elementos residuales de los aceros continua incrementándose, sin embargo, un estricto control en la selección de la compra mantendrá el total máximo de Cu, Cr y otros elementos estabilizadores de carburos a 0.15% o menos. Recordando, los aceros producidos en horno eléctrico tienen mayor cantidad de elementos perjudiciales que los aceros producidos en un horno de hogar abierto, debido a la dilución en el metal caliente. La mejor fuente común son las ruedas de los automóviles. Estos son aceros de estampado profundo, relativamente libres de los elementos estabilizadores de carburos.

#### 5.4. COQUE

Un coque de excelente calidad para la producción del hierro base en cubilote, tiene el siguiente análisis típico:

Coque de fundición:

92.23% Carbono Fijo  
0.49% Materia Volátil  
7.28% Cenizas  
0.55% Azufre

Este coque es satisfactorio para la mayoría de operaciones en el cubilote. Cuando se desea incrementar la ganancia de C, es recomendable el uso de carburo de Ca en la carga del combustible.

#### 5.5. FUNDEnte PIEDRA CALIZA

Raramente, se le da la atención merecida a la calidad de la piedra caliza. El siguiente análisis de la caliza de la Compañía Inland Lime & Stone servirá mejor para ilustrar la comparación con una "piedra caliza local" frecuentemente encontrada:

96.27%  $\text{CaCO}_3$     53.94%  $\text{CaO}$     2.36%  $\text{MgCO}_3$     1.13%  $\text{MgO}$     0.68%  $\text{SiO}_2$   
0.24%  $\text{R}_2\text{O}_3$

El factor de eficiencia se calcula del análisis sobre el exceso de los constituyentes básicos, es decir,  $\text{CaO} + \text{MgO}$  sobre el ácido  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , dividido entre 100. Para la piedra caliza Inland,

el factor de eficiencia es 1.85 comparado a los valores tan altos como 5.00 para piedras caliza de bajo grado que tienen muy limitada capacidad como fundente.

Los requerimientos se determinan por el cálculo de la cantidad necesaria, 1) para neutralizar la oxidación de los elementos metálicos en la carga, 2) para cancelar la ceniza ácida del coque, 3) para cancelar la arena adherida sobre las piezas de retorno, y 4) para el control del S en la operación del cubilote básico. Los cálculos pueden mostrar que el 10% del peso de la carga usando la piedra caliza con eficiencia de 1.85, es necesario para controlar los constituyentes ácidos en una operación totalmente básica. Progresivamente menores adiciones de caliza reducirán la basicidad y se acercará a las condiciones de fusión neutral y luego revertirá a ácido.

Subsecuente análisis de la escoria puede estimarse dividiendo los constituyentes que forman la escoria entre el peso total estimado. Muchos fundidores prefieren las piedras dolomíticas antes que la piedra caliza. Estos sostienen que se requiere algo menos de Mg, sin embargo, la principal ventaja es la mayor fluidez de la escoria y se requiere menos fluorita. Algunos productores de fundición nodular, emplean una combinación de los 2 tipos de fundentes (caliza y dolomita).

#### 5.6. FLUORITA - FUNDENTE SUPLEMENTARIO

La fluorita es necesaria en la operación del cubilote básico, para controlar la viscosidad de la escoria. Usar grados de la más alta eficiencia de tamaños preferentemente de 2" x 1", tan bajos en Pb como sea posible y de una estructura que no se desintegre en el ensayo al choque térmico.

La fluorita briqueteada ha demostrado ser más práctica en muchas operaciones debido a su conveniencia en el manipuleo y en virtud del hecho que esta descenderá dentro de la zona de fusión del cubilote con una predeterminada eficiencia.

#### 5.7. ADICION DE SILICIO A LA CARGA

Las operaciones del cubilote básico, generalmente, requieren adiciones de Si a la carga. En la fusión de los fierros base para fundi

ción nodular, el incremento del contenido de Si es un problema debido a que el tratamiento con aleaciones de ferrosilicio magnesio (Noduloy 5-C conteniendo 45 %Si), contribuyen con cantidades apreciables de Si. Esto a menudo limita la cantidad de Si que puede añadirse para la muy esencial post-inoculación de la fundición nodular.

Chequear cuidadosamente la carga suplementaria de las adiciones de Si, ya que pueden ser la fuente del boro (elemento subversivo). Específicamente, ningún boro podrá evitarse si se usa ferrosilicio de 50% en trozos. Las briquetas de ferrosilicio, también pueden contener B debido a que los finos empleados en su manufactura son generados de la producción de ferrosilicio de 50%. Un gran porcentaje del ferrosilicio de 50% contiene boro para usarse en la producción de fundición maleable. El grado de alta pureza del arrabio plateado Keokuk es la fuente más deseable de Si.

El carburo de Si en granos (Ferrocabo 90, conteniendo 63.0 %Si y 30.0 %C) puede ser usado como una fuente de Si y C, en la fusión de fierros base en horno eléctrico. Esta forma de Si pre-inocula a las fundiciones nodulares fundidas en horno eléctrico y puede reducir las durezas del fierro base tratado con Mg en bruto de colada, de 20 a 50 Brinell cuando se compara con fundiciones nodulares hechas con otras formas de Si. El Ferrocabo en briquetas conteniendo 65% de carburo de Si, puede usarse como una fuente de Si y C en la fusión en cubilote, de los fierros base para fundición nodular. Esta fuente de Si también pre-inocula y reduce los niveles de dureza de la fundición nodular en bruto de colada.

#### 5.8. MANGANESO

Por lo general, el contenido de Mn de la fundición nodular es relativamente bajo, sin embargo, en la fundición nodular perlítica en bruto de colada, tendrá niveles de Mn en el rango de 0.70%. Son recomendables como la más deseable fuente de Mn, las adiciones de FeMn en la carga del horno de fusión. La adición de FeMn puede ser en forma de trozos o briquetas.

#### 5.9. NIQUEL

Las mejores fuentes de Ni a usarse en la producción de fundición nodular, son las siguientes:

- Níquel electrolítico.
- Pellets de Ni (99.97 %Ni).
- Incomag N° 3.

#### 5.10. COBRE

La mejor fuente de cobre es el cobre electrolítico puro en perdigones (99.99%). Debe evitarse el uso de cobre secundario, debido a que este, a menudo, contiene elementos subversivos tales como Pb, Sb y As.

C A P I T U L O   V I .- P R E A C O N D I C I O N A M I E N T O   Y   D E S U L F U R I Z A C I O N

El preacondicionamiento de la fundición nodular abarca muchas vías de control. Uno de los principales objetivos es suministrar un aumento en los núcleos para que los últimos efectos adversos del sobreenfriamiento sean inhibidos.

Cada núcleo de cristalización esferoidal crece y comprende una célula eutéctica en las composiciones hipoeutécticas. Cada uno es rodeado por su manto austenítico. Mientras mayor sea la cantidad de células o cantidad de nódulos, tanto menor es la influencia del sobreenfriamiento. Composiciones hipereutécticas pueden tener más de 1 nódulo por célula eutéctica y la calidad de fundición nodular tiene de 5 a 20 veces el número de células por pulgada cuadrada, que la fundición gris. El preacondicionamiento puede ser la alteración de la solidificación eutéctica de un baño por el "sembrado" con núcleos.

Otra área para el preacondicionamiento es eliminar los excesivos elementos gaseosos del baño para borrar su influencia de retención de los carburos primarios.

Algo de nitrógeno es expelido del baño, si la concentración es superior a 80 y 90 partes por millón, durante el tratamiento con Mg. La inyección de nitrógeno molecular parece ser que elimina algo del nitrógeno disuelto en el baño. El nitrógeno seco burbujeado a través del baño reduce el hidrógeno a concentraciones tolerables, si el hidrógeno se vuelve un problema. Es importante el control del contenido de oxígeno, a medida que una cantidad variable puede consumir una cantidad variable de Mg. De cualquier modo, la eliminación del oxígeno se asocia con el fenómeno de inoculación, de este modo el preacondicionamiento constituye la desgasificación.

Una técnica de preacondicionamiento, que ofrece una considerable ventaja económica, tanto como una gran calidad, es la desulfuración. La eliminación del S desde los altos niveles, como los producidos en coladas de cubilote ácido, de 0.10% a 0.03%, requerirá de aproximadamente 12 lbs. menos de la aleación 9% de ferrosilicio magnesio, para esferoidizar efectivamente el grafito, con un contenido apropiado de Mg residual.

Resumiendo, el preacondicionamiento constituye un beneficio

del baño previo al proceso de esferoidización para obtener ventajas económicas y en la calidad. La técnica puede consistir de: a) Sembrado con núcleos potenciales para incrementar la cantidad de nódulos y las ventajas que se generan de ello; b) Desoxidación y la posible reducción de otros elementos gaseosos perjudiciales; c) Desulfurización.

### 6.1. DESOXIDACION

Como se describió en los anteriores capítulos, la pre-inoculación del baño minimiza el potencial para los carburos primarios. Se introducen el carburo de Si o pequeñas adiciones de Ca, preferentemente la aleación calcio silicio de 15% o 30%, sirven como poderosos desoxidantes y pre-inoculantes. Tales adiciones son particularmente útiles para baños en horno eléctrico donde el metal está a alta temperatura por largos períodos, en comparación a las características de fusión relámpago exhibido por la fusión en cubilote.

Se ha establecido que la desoxidación tanto como la desulfurización es un pre requisito para la formación de grafito esferoidal. El Mg se combina con el oxígeno como resultado de ello los fierros base conteniendo, relativamente, altos niveles de óxidos requerirán cantidades adicionales de Mg en el tratamiento de esferoidización. El carburo de Si es un potentísimo desoxidante e inoculante. Cuando se usa el carburo de Si (Ferrocarbo) en la fusión en cubilote u horno eléctrico, este reduce los requerimientos de Mg por la desoxidación del fierro base y reduce la dureza total de la fundición nodular tratada en la condición de bruto de colada, por la pre-inoculación del fierro base. El carburo de Si, también se emplea para contrarrestar la influencia del vapor de agua de los niveles de alta humedad en la fusión en cubilote.

### 6.2. PREACONDICIONAMIENTO PREVIO AL TRATAMIENTO CON MAGNESIO

Los fierros base fundidos en cubilotes ácidos con contenidos de S en el rango de 0.05% a 0.10%, usualmente, requieren excesivas cantidades de aleación de Mg en el tratamiento que produce fundición nodular. Esto, a menudo, resulta en la presencia de cantidades excesivas de óxido y sulfuro de Mg (dross) en el metal tratado que no puede eliminarse y que origina la presencia de inclusiones de escoria y cuarteaduras en las piezas. Si no es posible un tratamiento de desulfurización, pue-

de reducirse el requerimiento de aleación de Mg, por el pretratamiento del fierro base con pequeñas cantidades de tierras raras o aleaciones de tierras raras con Si tal como la aleación CSF N° 10, una aleación que contiene de 9% a 11% de cerio o 12% a 15% de tierras raras en total. Los elementos de las tierras raras se combinan con el S en el fierro para formar sulfuros estables que no se combinan con el Mg en el tratamiento con aleación de Mg, usado para producir fundición nodular. La eficiencia de este tratamiento está en el rango de 90%. Este procedimiento es, particularmente, efectivo para el proceso "En el Molde". 0.1% de CSF N° 10 se combina con 0.01 %S.

### 6.3. DESULFURIZACION

Los cubilotes ácidos tienen una, relativamente, alta velocidad de fusión comparada a la práctica de fusión básica y producen fierros base con adecuados niveles de C, Si y Mn, para la producción de fundición nodular. Sin embargo, los niveles de S caen en el rango de 0.08% a 0.12%. A fin de producir los fierros base con bajo S, que pueden usarse para producir piezas de fundición nodular que estén libres de cantidades excesivas de escoria y rajaduras superficiales, se requiere un tratamiento de desulfurización. Esto hará posible la adición nominal requerida de aleación de Mg para producir grafito nodular con un mínimo de sulfuros, óxidos y silicatos de Mg. A continuación, se describen algunos de los más importantes tratamientos de desulfurización usados con prácticas de fusión en cubilote ácido.

1) DESULFURIZACION CON SODA ASH (Carbonato de Na  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).- Uno de los métodos conocidos más ampliamente de eliminar el S de fierros producidos en cubilote, es por la introducción de soda ash dentro del "lavador" entre el cubilote y la cuchara receptora. En este procedimiento, la soda ash se mezcla con el fierro fundido en el lavador y fluye dentro de una cuchara receptora. La desulfurización tiene lugar en el lavador y a medida que el fierro pasa a través del fierro en la cuchara receptora. El lavador debe revestirse con refractarios de carbón o una alúmina de 90% para resistir la escoria formada por la soda ash. Las cucharas receptoras deben tener un canal de escoriado para eliminar el exceso de escoria y un pico de tetera para retirar el metal. La capa de escoria en la cucha



ra debe ser de 4" a 8" de espesor. El exceso de escoria debe eliminarse a intervalos que progresa la fusión. Se tiende a mejorar su efectividad con adiciones de, aproximadamente, 2 lbs. de grafito por ton. añadida a la escoria de soda ash en la cuchara receptora. La Tabla 6.1, es representativa de resultados típicos.

TABLA 6.1.- DESULFURIZACION DEL FIERRO BASE CON SODA ASH

Adición de Soda Ash		Contenido promedio de S	
%	lbs/ton	Antes del tratamiento	Después del tratamiento
1.0	20	0.11	0.047
2.0	40	0.11	0.030
3.0	60	0.11	0.022
4.0	80	0.11	0.013

Esta práctica de desulfurización está acompañada por una pérdida de Si de 0.06% y pérdidas de temperatura de 10 °C a 11 °C por cada adición de 0.5% de soda ash.

La desulfurización con soda ash no esta exento de problemas. En ocasiones la escoria de soda ash tiende a mezclarse con fierro, particularmente cuando la cuchara receptora es baja. El desgaste del refractario es fuerte bajo condiciones óptimas. Adicionalmente, los humos desprendidos de la escoria representa un peligro para la salud del personal de operación y ataca al acero de las estructuras del edificio y de los equipos.

2) DESULFURIZACION CON TAPON POROSO.- El método del tapón poroso para la desulfurización del fierro fundido, está basado en un método de agitación del metal líquido por la introducción de gas nitrógeno dentro de una cuchara o dentro de un "tazón" de tratamiento continuo anexo al canal de sangrado del cubilote. El carburo de calcio granular (malla -14) que actúa como un agente de desulfurización puede añadirse como una simple adición sobre el fondo de la cuchara con tapón poroso o continuamente en tazones o basines de tratamiento con tapón poroso, como se presenta en la Figura 6.1. En la desulfurización con tapón poroso, las burbujas de gas ascendentes producen una acción de mezclado sobre la superficie de contacto del metal y el

carburo de Ca granular. Esta circulación del metal acelera la acción de sulfurante del carburo de Ca, tal como se describe en el Capítulo VII.

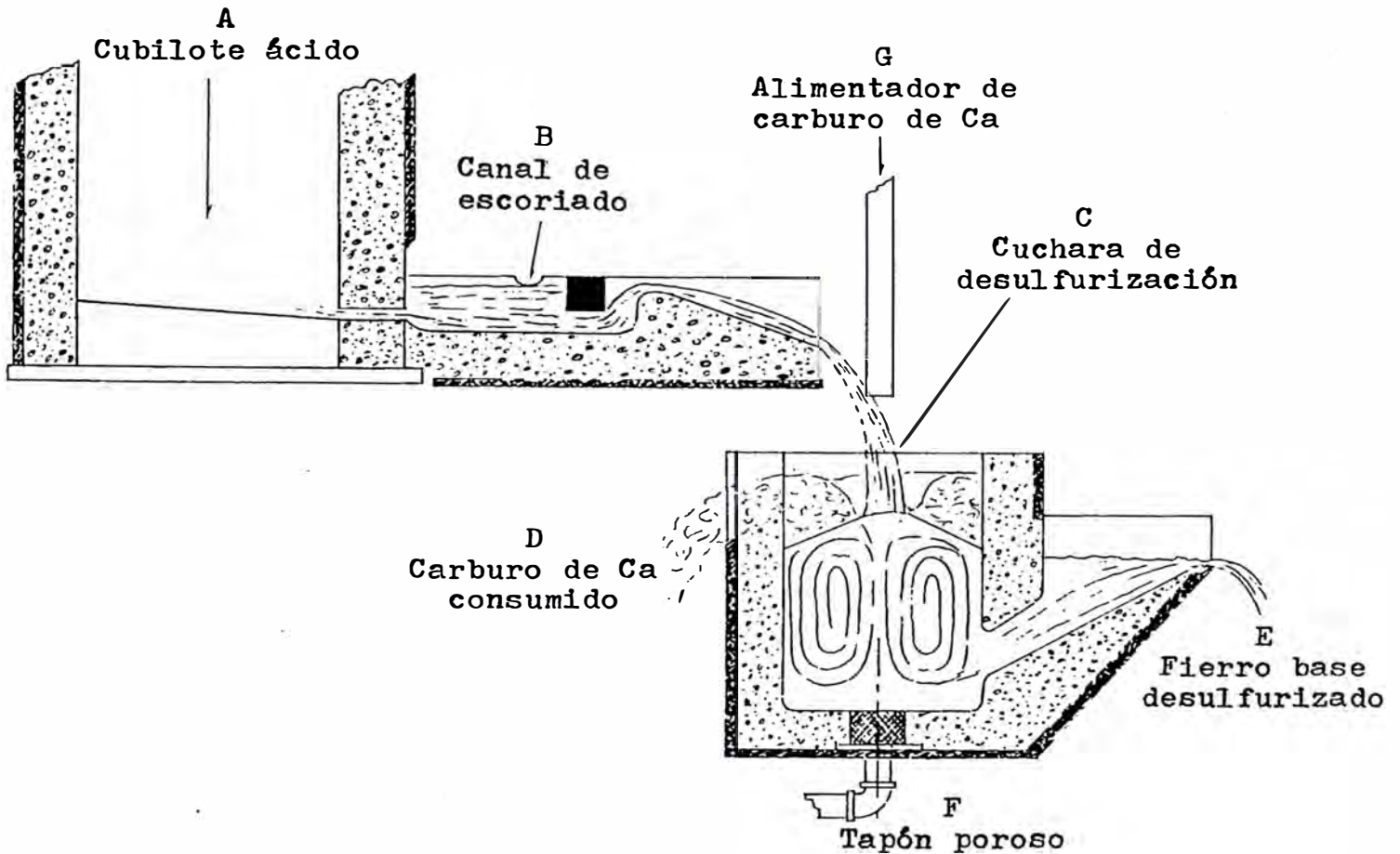


FIGURA 6.1.- Dibujo esquemático de la desulfuración con carburo de calcio en un cubilote ácido, por el método del tapón poroso.

En el tratamiento simple de desulfuración o en baño, aproximadamente el 85% al 90% del S inicial en el fierro base puede eliminarse con una adición de carburo de Ca igual a 10 veces el contenido de S del fierro en casi 1.5 a 2 minutos. Este tipo de tratamiento implica la introducción de una simple adición de carburo de Ca a medida que se llena la cuchara de tratamiento. Esto es muy efectivo cuando se usa en combinación con un cubilote ácido u horno eléctrico previo al tratamiento con Mg. La desulfuración en baño puede también usarse como un paso intermedio en el proceso duplex.

Un procedimiento de desulfuración continua recientemente de

sarrollado, implica la introducción continua de carburo de calcio con un alimentador dentro de un basín de tratamiento, como se muestra en la Figura 6.1. El nivel inicial de S puede reducirse de 0.13% a 0.01% por la adición de 0.5% a 0.8% de carburo de calcio y el mantenimiento de una cubierta de 6" de carburo de Ca sobre el metal fundido en el basín de tratamiento. Por cada ton. por hora de velocidad de fusión, se requiere una adición de, aproximadamente, 0.25 lbs. de carburo de Ca por minuto. La adición de carburo de Ca y el chorro de metal del cubilote se introducen dentro del basín de tratamiento al punto donde las burbujas o turbulencia del nitrógeno que inducen la acción de agitación, rompan completamente la cubierta de carburo de calcio. Esta desulfurización continua se usa en operaciones del cubilote con escoria ácida o neutral. Se ha usado con velocidades de fusión de hasta 30 ton. por hora.

3) DESULFURIZACION CON CUCHARA DE SACUDIDAS.- La cuchara de sacudidas fue desarrollada originalmente en Suecia y se ha usado en los últimos 30 años. La primera instalación en los E.E.U.U. fue en 1,964-1,965 en la Compañía Fundidora Lynchburg. La cuchara de sacudidas tiene la forma de un convertidor, la cual se muestra en la Figura 6.2, gira con un movimiento excéntrico sobre un eje vertical.

La cuchara no se sacude. En cambio, la estructura en U con la cuchara en sus cojinetes gira tranquila y fácilmente en un movimiento excéntrico circular. La acción de mezclado mecánico de la cuchara puede demostrarse usando un vaso de vidrio alto, llenado 1/3 completamente con agua conteniendo una pequeña pizca de cenizas y girando el vaso con un movimiento excéntrico sobre una superficie plana. La mano simulará la estructura en U. Cuando se desarrollan suficientes revoluciones por minuto y excentricidad en el movimiento circular, el material liviano insoluble se dispersará eficientemente por todo el líquido. La cantidad de líquido en el vaso, los RPM, la excentricidad y la finura del material liviano insoluble a ser dispersado por todo el líquido, están relacionados unos a otros. Se obtiene una adecuada acción de mezclado a través de esta relación.

Las cucharas de sacudidas son revestidas con refractarios de 70% de alúmina, en los E.E.U.U., para minimizar la erosión del refracta

rio. En ciertas instalaciones de Europa se usan refractarios básicos. Sin embargo, esta práctica fue encontrada demasiado costosa en Lynch burg.

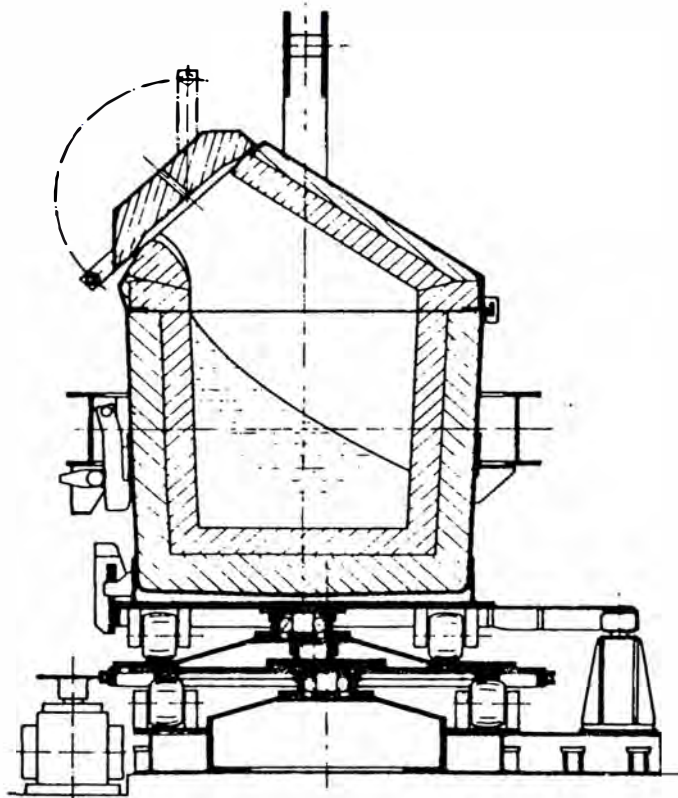


FIGURA 6.2.- Cuchara de sacudidas de 3 tons.

La desulfurización en una cuchara de sacudidas consiste de los siguientes pasos:

La cuchara se inclina un ángulo de  $45^\circ$  para que la abertura de la cuchara presentada en la Figura 6.2 esté horizontal y se llena con fierro del cubilote a casi  $1/3$  del total.

- Se requieren temperaturas de metal en el rango de  $1,620^\circ\text{C}$  cuando se producen piezas fundidas. Pueden tolerarse bajas temperaturas en la producción de tuberías.

Después de llenar la cuchara se retorna a la posición vertical y se lleva hasta la velocidad de rotación de 50-55 RPM.

En este punto se hace la adición del carburo de calcio. Cuando se requiere un nivel de azufre de 0.01%, es necesaria una adición de 0.05% de carburo de calcio por cada 0.01% de S en el fierro base. El ciclo de desulfurización requerido es de 8 a 10 minutos.

Cuando el ciclo de tratamiento se completa, la cuchara se inclina

a la posición horizontal para vaciar el metal tratado.

- En este momento, se invierte la cuchara de sacudidas y se elimina el remanente de carburo de Ca.

El método de desulfurización con cuchara de sacudidas es solamente satisfactorio en casos de grandes volúmenes de metal (en exceso de 5 tons.). Cuando se trata de producciones de pequeñas piezas, usualmente, es necesario sobrecalentar el metal desulfurizado antes del tratamiento con Mg.

4) DESULFURIZACION POR INYECCION DE CARBURO DE CALCIO.- La inyección de carburo de Ca se ha usado por muchos años para desulfurizar el fierro base del cubillo te ácido en la producción de fundición nodular. Normalmente, el carburo de calcio de malla -20 se inyecta dentro del tipo de antecrisol presentado en el Capítulo VII, "método de inyección" de tratamientos de nodulización, usando nitrógeno como el gas portador a través de un tubo de carbón.

El equipo empleado en este procedimiento consiste de un tanque fluidizador similar a aquel usado para el rociado de refractario, que está anexado al suministro de gas nitrógeno con controles de presión y un tubo hueco de carbón conectado al fluidizador con mangueras del tipo de alta presión. El tubo hueco de carbón se sumerge dentro del bañín de tratamiento a la distancia de 3" del fondo. Los tubos de grafito no están en una posición perpendicular, sino entran dentro del baño a un ángulo de 70° a 80°. Esto permite al carburo salir del tubo fácilmente para dispersarse dentro del baño y disminuye la erosión sobre el lado del tubo.

Para una óptima efectividad las temperaturas de tratamiento del metal deben estar a un mínimo de 1,590 °C. Aproximadamente de 1.2% a 1.5% de carburo de calcio reducirá a un fierro base con 0.11 %S a menos de 0.02 %S. Se requiere de 35 a 40 pies<sup>3</sup> de gas nitrógeno para desulfurizar 1 ton. de fierro base a los niveles de S indicados. Los tubos de grafito se consumen hasta 4 lbs. por ton. de metal tratado. El carburo de calcio consumido debe rasparse de la superficie del baño de metal a medida que este entra a la superficie o declinará la eficiencia de la eliminación del S.

Aún cuando la inyección de carburo, efectivamente elimina el S de los fierros base del cubilote ácido, este tiene las siguientes de vent aj as :

- Costo de los materiales y de la mano de obra.
- Un nivel relativamente alto de humos y polvo.
- Altas pérdidas de la temperatura del metal.

5) DESULFURIZACION POR AGITACION MECANICA.- En los años recientes se han desarrollado un número de dispositivos de agitación mecánica para la desulfurización, recarburización, aleación y para el tratamiento con Mg. Probablemente, el más conocido de estos dispositivos es un agitador con paletas de brazo recto llamado el agitador Rheinstahl. Este agitador bastante macizo es hecho de material refractario. Su operación consiste en la inmersión del agitador-paleta en una cuchara de metal fundido y rotándolo a una adecuada velocidad de mezclado. Estos agitadores se hacen en tamaños capaces de desulfurizar cucharas de 5 a 20 tons. de fierro base. Pruebas para desulfurizar fierro en cantidades menores de 5 tons., han resultado en pérdidas de temperatura de tal magnitud que la fundición nodular producida posteriormente estaba demasiado fría para la producción satisfactoria de piezas de tamaño pequeñas y medianas.

La acción de mezclado del agitador Rheinstahl es similar a aquel de un mezclador de cocina; como resultado de ello las adiciones se cas de carburo de Ca para la desulfurización son mezcladas dentro del fierro fundido. La acción de agitación también hace posible uniformizar la temperatura del fierro en el contorno de toda la cuchara. Las veloc ida des de rotación para estos mezcladores son normalmente ajustables entre 30 y 100 RPM. Las velocidades de mezclado dependen de la aplicación en particular.

El procedimiento para desulfurización con carburo de Ca, consiste de los siguientes pasos:

El agitador caliente se introduce dentro del metal fundido y lleva do a la velocidad de operación.

- En este punto, el carburo de calcio de malla -20 se introduce dentro de la cuchara a través de un agujero en la cubierta o capa. Pa ra reducir el contenido de S del fierro base a 0.01%, una adición

de carburo de Ca de aproximadamente 10 veces el contenido de S del fierro base más un 15% adicional.

- El tiempo de agitación requerido es de 4 a 6 minutos. Las pérdidas de temperatura para cucharas de 5, 10 y 15 tons. son 14 °C, 11 °C y 5.6 °C respectivamente.

A menudo, los fierros base para la producción de fundición no dular desulfurizados por cualquiera de los métodos descritos en este ca pítulo, requieren recalentarse en hornos auxiliares antes que sean tratados con Mg por los métodos convencionales de nodulización. Esto es particularmente cierto cuando se van a producir pequeñas piezas en el rango de varias onzas a 10 lbs.

**C A P I T U L O   V I I   . -   T R A T A M I E N T O S   D E   N O D U L I Z A C I O N**



La clave en la producción exitosa de fundición nodular es realizar la formación de grafito esferoidal en el fierro fundido, por la adicción de pequeñas pero significativos porcentajes de Mg solamente o en combinación con elementos de las tierras raras tales como el cerio. Aún cuando otros elementos tales como cerio, calcio, litio, sodio, ytrio, etc., promueven la formación de grafito esferoidal o nodular, el Mg es, comúnmente, el más simple y el método más económico para producir fundiciones nodulares. La mínima cantidad de Mg retenido necesario para producir esencialmente grafito nodular varía entre 0.018% y alrededor de 0.05%; y se determina fundamentalmente por el contenido de S y oxígeno del fierro base, como se discutió en el Capítulo III.

A las temperaturas de tratamiento del fierro base, el Mg y las aleaciones de Mg debido a la relativamente baja temperatura de vaporización del Mg (1,107 °C) exhiben características violentas y explosivas.

Se ha realizado bastante esfuerzo para controlar estas características pirotécnicas y volátiles. Como resultado de ello muchas aleaciones que contienen Mg, formas de Mg metálico y briquetas conteniendo Mg, han sido patentados. Se han desarrollado muchas técnicas para usar más eficientemente estos productos. En este capítulo se revisarán y evaluarán los más importantes de estos métodos de tratamiento.

#### 7.1. CALCULO DEL % DE MAGNESIO REQUERIDO

Para una óptima eficiencia y economía, el fierro base usado para producir fundición nodular debe desoxidarse y tener un nivel de S de menos de 0.02%. Sin embargo, se toleran altos niveles de S en los fierros base de cubilote ácido. En este caso, el Mg actúa como un desulfurizador, un desoxidante y un agente nodulizante. La relación del peso atómico del Mg y S (1 átomo de Mg se combina con 1 átomo de S para formar MgS) es 0.76. Sin embargo, los cálculos usados en la determinación de los requerimientos para el tratamiento de fundición nodular, están basados, usualmente, en que 1 lb de S se combina con 1 lb de Mg.

Obviamente, un fierro base con bajo S bien desoxidado, requerirá una menor cantidad de Mg. Lo siguiente es una reseña de un método que puede usarse para determinar los requerimientos de Mg para producir fundición nodular. El factor de eficiencia referido en estos cálculos

es aún un valor intangible determinado por la experiencia. En general, el factor de eficiencia está relacionado a la práctica de tratamiento empleada para producir fundición nodular.

Fórmula:

$$\% \text{ Recuperación del Mg} = \frac{\% \text{ Mg en el hierro}}{\% \text{ Mg añadido} - \% \text{ S en el hierro base}} \times 100$$

Ejemplo:

$$\text{S del hierro base} = 0.02\%$$

$$\text{Mg añadido} = 0.22\%$$

$$\% \text{ Mg de la fundición nodular} = 0.05\%$$

$$\% \text{ Recuperación del Mg} = \frac{0.05 \% \text{ Mg}}{0.22 \% \text{ Mg} - 0.02 \% \text{ S}} \times 100 = 25\%$$

Fórmula:

$$\% \text{ Adición de Mg} = \frac{\% \text{ Mg deseado}}{\% \text{ Recuperación del Mg} \times 0.01} + \% \text{ S en el hierro base}$$

Ejemplo:

$$\text{S del hierro base} = 0.02\%$$

$$\% \text{ Recuperación del Mg} = 25.0\%$$

$$\% \text{ Mg en la fundición nodular} = 0.05\%$$

$$\% \text{ Adición de Mg} = \frac{0.05 \% \text{ Mg}}{25\% \text{ Recuperación del Mg} \times 0.01} + 0.02 \% \text{ S} = 0.22 \% \text{ Mg}$$

Cuando se ha determinado el Mg requerido para una práctica dada, la cantidad de un tipo dado de aleación de Mg para el tratamiento, se determina como sigue:

Fórmula:

$$\% \text{ Aleación de Mg} = \frac{\% \text{ Mg requerido para producir fundición nodular}}{\% \text{ Mg en la aleación} \times 0.01}$$

Ejemplo:

$$\% \text{ Mg en la aleación} = 10\%$$

$$\% \text{ Mg requerido para producir fundición nodular} = 0.22\%$$

$$\% \text{ Aleación de Mg} = \frac{0.22 \% \text{ Mg}}{10 \% \text{ Mg} \times 0.01} = 2.2\%$$

Cuando se usan tierras raras en el proceso de fundición nodular para reemplazar una parte del Mg en el tratamiento, es recomendable que las tierras raras se añadan 0.7 de tierras raras a una base de 1.0 de Mg. La recuperación de las tierras raras está en el rango de 90%, debido a la alta temperatura de volatilización de este elemento (3,423 °C). El contenido de tierras raras residual o no combinado en la fundición nodular, nunca debe exceder a 0.03% o una cantidad excesiva de carburos se producirán en el fierro.

a) PERDIDAS DE MAGNESIO DEL FIERRO LIQUIDO.- Generalmente, el Mg se pierde muy lentamente de una cuchara que se mantiene bajo condiciones normales, particularmente, donde existe una ligera cubierta de escoria y las temperaturas caen gradualmente. La oxidación o pérdida del Mg, no solamente se limita a la exposición de la superficie de metal, sino también puede aumentarse por un revestimiento de sílice en la cuchara o por la presencia de una capa de óxido de fierro sobre cualquier parte de la cuchara en contacto con la fundición nodular fundida. La pérdida se tenderá a minimizar con un revestimiento de alúmina neutral o un revestimiento básico de la cuchara.

Ensayos de laboratorio, usando un horno eléctrico con control de temperaturas, indican que la velocidad de la pérdida de Mg a 1,480 °C es aproximadamente 0.001% por minuto. A menores temperaturas la velocidad de pérdida es aún menor.

b) PERDIDAS DE CARBONO DURANTE EL TRATAMIENTO.- Existe un fenómeno muy conocido de pérdida de C durante el tratamiento de la fundición nodular. Se ha encontrado que los esferoides de carbono son realmente "sopladuras" del fierro por el vapor del Mg a medida que este sale del fierro. La Figura 7.1 presenta estos esferoides que fueron recuperados del polvo de MgO depositados sobre la porción superior de la cuchara de tratamiento. Los esferoides de carbono se separaron disolviendo el MgO en una solución de HCl.

## 7.2. TRATAMIENTOS DE NODULIZACION

Hoy en día existen muchos métodos diferentes de tratamiento, usados para producir piezas de fundición nodular. Todos los métodos implican la introducción de alguna forma de Mg solo o en combinación con

el cerio y otros metales o compuestos de las tierras raras. En la mayoría de casos, el tipo del material de tratamiento es grandemente influenciado por la confiabilidad y eficiencia de las técnicas de tratamiento. La práctica de fusión es también un factor determinante en la elección de los métodos de tratamiento a usarse en la producción de fundición nodular. Luego de tomar en cuenta estos factores, la mayoría de productores evalúan los métodos de tratamiento sobre la base de la cantidad de Mg y otros materiales requeridos para alcanzar una consistente nodularidad del grafito en el fierro y la adaptabilidad del proceso para la producción de fundición nodular a la temperatura y en la cantidad requerida para el tipo y tamaño de piezas a producir. Por estas razones ninguna práctica de tratamiento es satisfactoria para todas las fundiciones. A continuación se presentarán las descripciones y discusiones de sus méritos, de los principales métodos de tratamiento de nodulización.

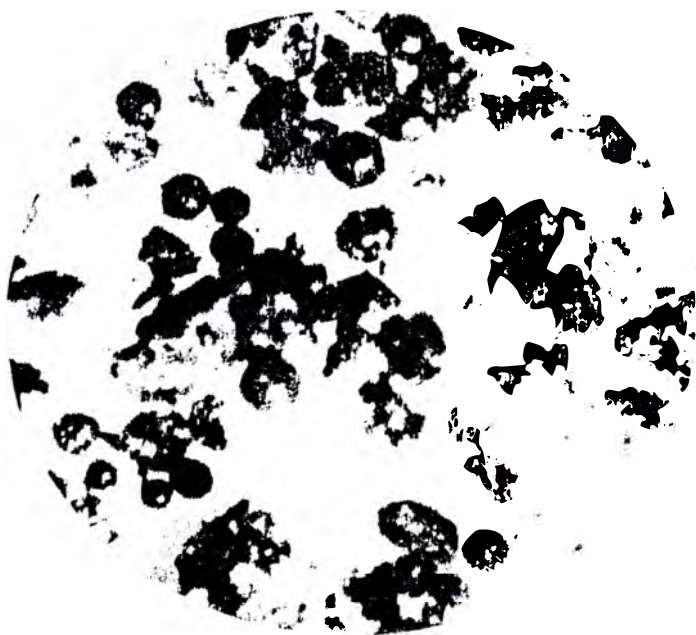


FIGURA 7.1.- Esferoides de carbono y sílice, a 100 X.

1) PROCESO SOBRE EL VACIADO.- El tratamiento de los fierros base usando Mg puro es teóricamente posible, sin embargo, debido a la violencia de la reacción entre el Fe y Mg puro, esta vía no es práctica para usarse en la producción de piezas de fundición nodular. Bajo las condiciones prácticas de producción es necesario usar

una aleación que contenga Mg que modere la reacción, por la reducción de la velocidad en la que los vapores de Mg se liberan del fierro base.

El procedimiento más simple que puede usarse para producir fundición nodular, es vaciar fierro fundido sobre una aleación Ni-Mg que tiene una mayor gravedad específica que el fierro base. Este fue el primer método práctico comercial utilizado e implica el empleo de una aleación maestra de 85 %Ni y 15 %Mg.

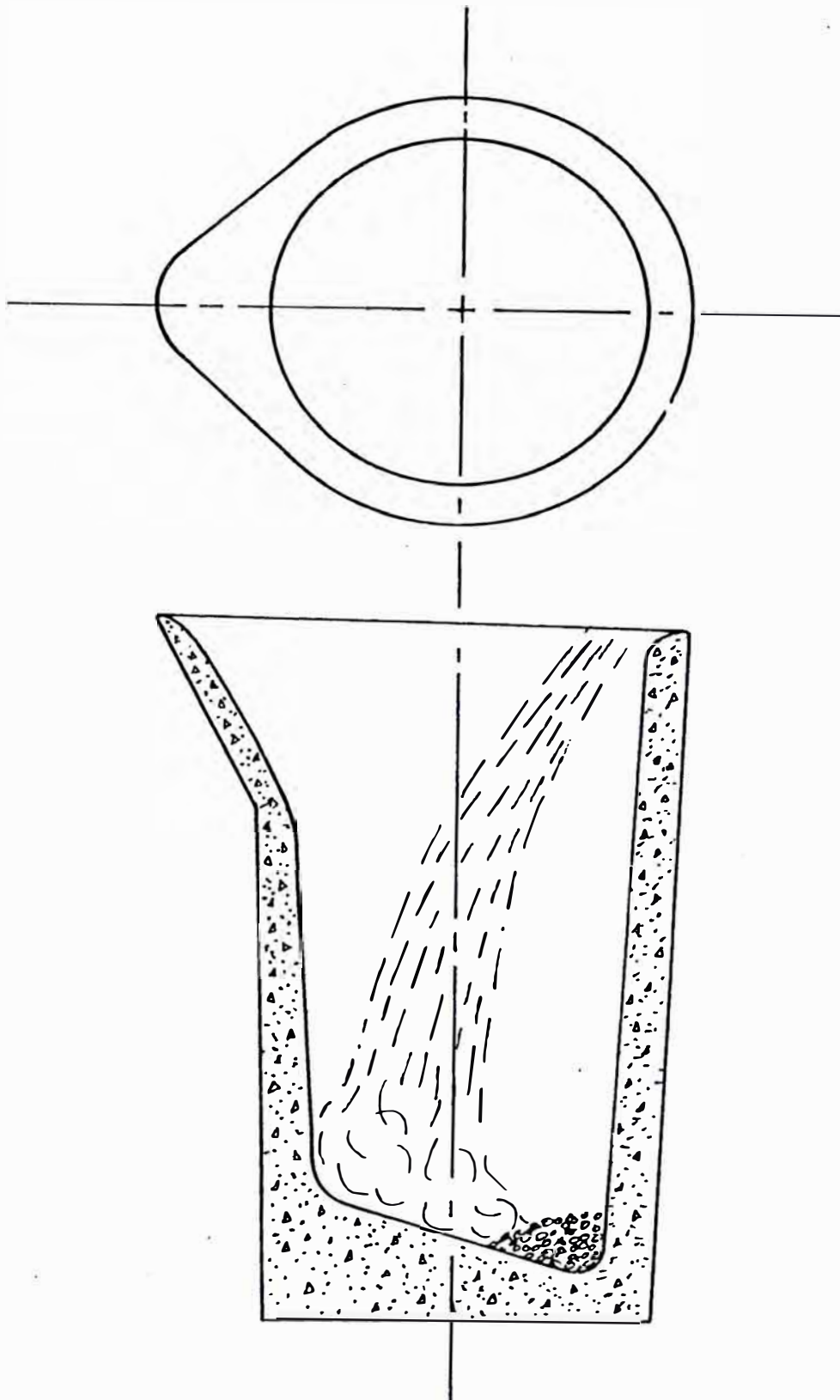
Cuando el método "sobre el vaciado" fue usado en combinación con una aleación Ni-Mg del grado 85% níquel y 15% magnesio, se obtuvieron hasta 60% de recuperaciones de Mg.

Recientemente una aleación de Ni conteniendo 95% Ni y 5% Mg, ha hecho posible hasta 90% de recuperaciones de Mg. Se usan otras aleaciones en el proceso "sobre el vaciado", sin embargo, las recuperaciones de Mg son considerablemente más bajas que aquellas referidas previamente. El siguiente es un resumen de las recuperaciones de Mg, de aleaciones usadas en el proceso "sobre el vaciado".

TABLA 7.1.- ALEACIONES DE Mg USADAS EN EL METODO "SOBRE EL VACIADO"

Tipo	Mg	Ni	Si	Ca	Ce	Fe	Recuperación del Mg, %
Incomag 3	4.0-4.5	95					85-95
Incomag 4	4.0-4.5	60				32-36	75-85
Incomag 1	14-16	50	35				40-50
Incomag 2							30-40
Noduloy 5-C				0.80	0.7		15-30
Noduloy 9-C				0.80	0.7		10-25

Las recuperaciones de Mg más altas obtenibles en el método sobre el vaciado, son posibles cuando la profundidad de la cuchara de tratamiento es aproximadamente 3 veces el diámetro de la cuchara. Sin embargo, debe señalarse que las cucharas de tratamiento con diámetros menores de 15" tienden a formar escoria bastante rápidamente. La Figura 7.2 es un dibujo esquemático de una cuchara para usarse en el método sobre el vaciado.



**FIGURA 7.2.- Cuchara del método "sobre el vaciado"**

Este método de producción de fundición nodular puede usar fierros base con, relativamente, alto S (0.07% a 0.09%), no obstante, la eficiencia y recuperación del Mg más altas, es posible con fierros base de bajo S.

El procedimiento del tratamiento con el método sobre el vaciado, es como sigue:

- Colocar la cantidad requerida de aleación de tratamiento en una pila sobre el fondo de una cuchara limpia de tratamiento, precalentada a una temperatura en exceso de 1,150 °C, como se muestra en la Figura 7.2.
- Vaciar una altura dada de fierro base sobre la aleación de tratamiento tan rápidamente como sea posible. Cuando se completa la reacción, escoriar tan pronto como sea posible.
- Inocular el fierro con un inoculante apropiado tal como el FeSi de 75% con Ca o Inoculoy 63. El inoculante debe añadirse en el chorro a medida que el fierro tratado se transfiere de la cuchara de tratamiento a la cuchara de vaciado. En ciertos casos la inoculación con FeSi se hace en el último tercio del fierro base, a medida que este es vaciado dentro de la cuchara de tratamiento.

La Figura 7.3, presenta la influencia de la temperatura del fierro base sobre la recuperación del Mg a partir de la aleación N.M.A. N° 1 (15 %Mg y 85 %Ni), cuando se usa el método sobre el vaciado.

2) METODO SANDWICH.- El método "sandwich", probablemente, es el método usado más ampliamente para producir fundición nodular en grandes tonelajes para piezas de la industria automotriz. Esta técnica tiene un número de variaciones aún cuando los principios básicos permanecen iguales. Esto implica colocar la aleación de Mg, para el tratamiento, en una depresión localizada en el fondo de la cuchara y cubrirla con virutas o recortes de acero. La Figura 7.4, es una vista de la sección de una cuchara con la aleación y cubierta de acero en su lugar. La ilustración también presenta como el chorro de metal se dirige alejándose de la aleación y cubierta de acero.

La experiencia con este método indica que se dan mayores recuperaciones de Mg que las obtenidas por el método sobre el vaciado, previamente discutido. La mayor parte de la reacción esta confinada al fon

do de la cuchara y tiene lugar a una reducida velocidad, probablemente, debido a que la temperatura del hierro base en el área del acero y la aleación, se reduce cuando el acero se funde. Esta menor temperatura es la causa del incremento en la recuperación del Mg de la aleación de tratamiento, en efecto, el hierro sobretratado en el fondo de la cuchara de tratamiento, posteriormente es diluido por el hierro más caliente de arriba. Esto resulta en un total incremento en la recuperación del Mg.

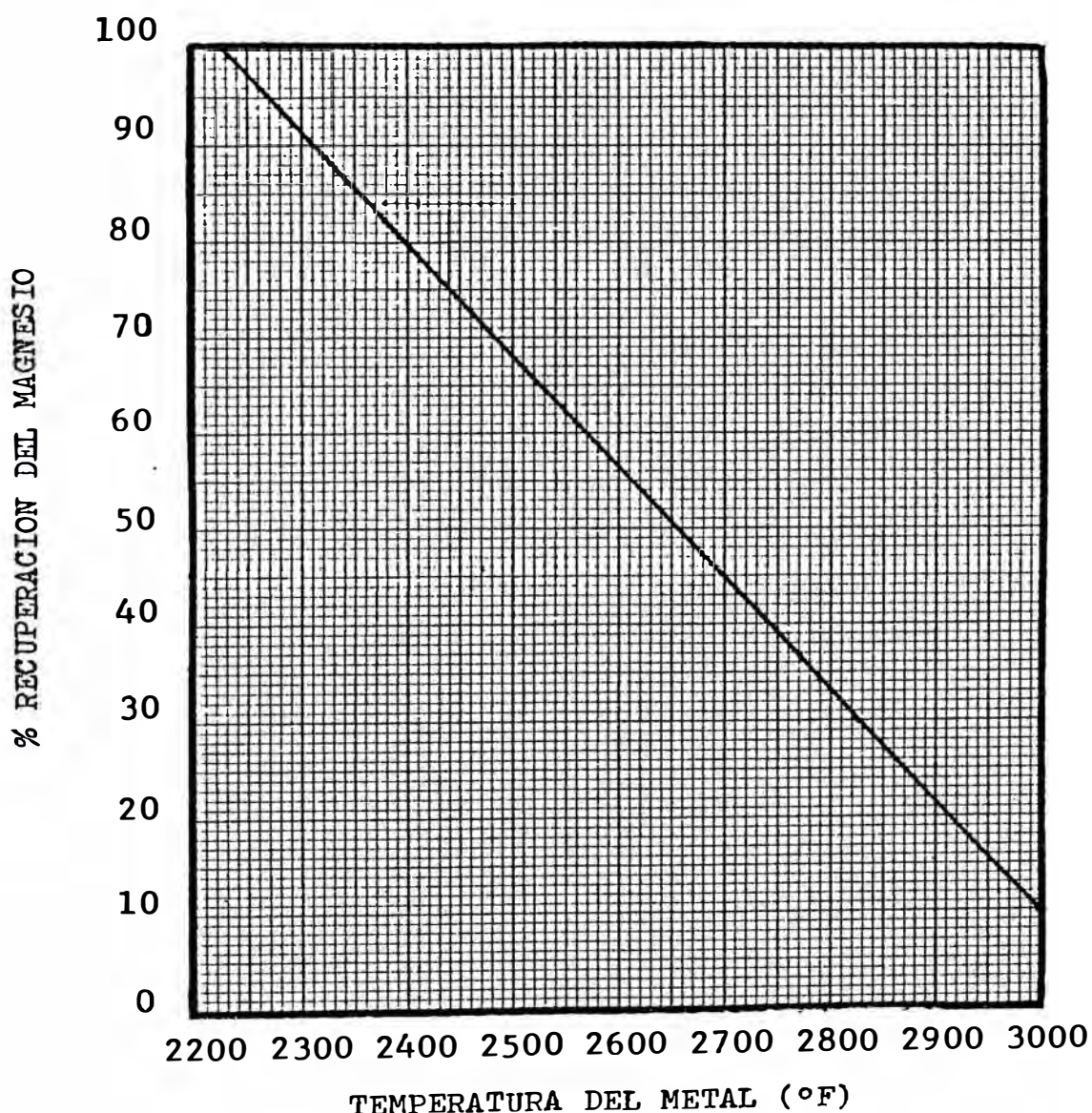


FIGURA 7.3.- Influencia de la temperatura sobre la recuperación del Mg, en una aleación de Ni-Mg (Incomag 2).



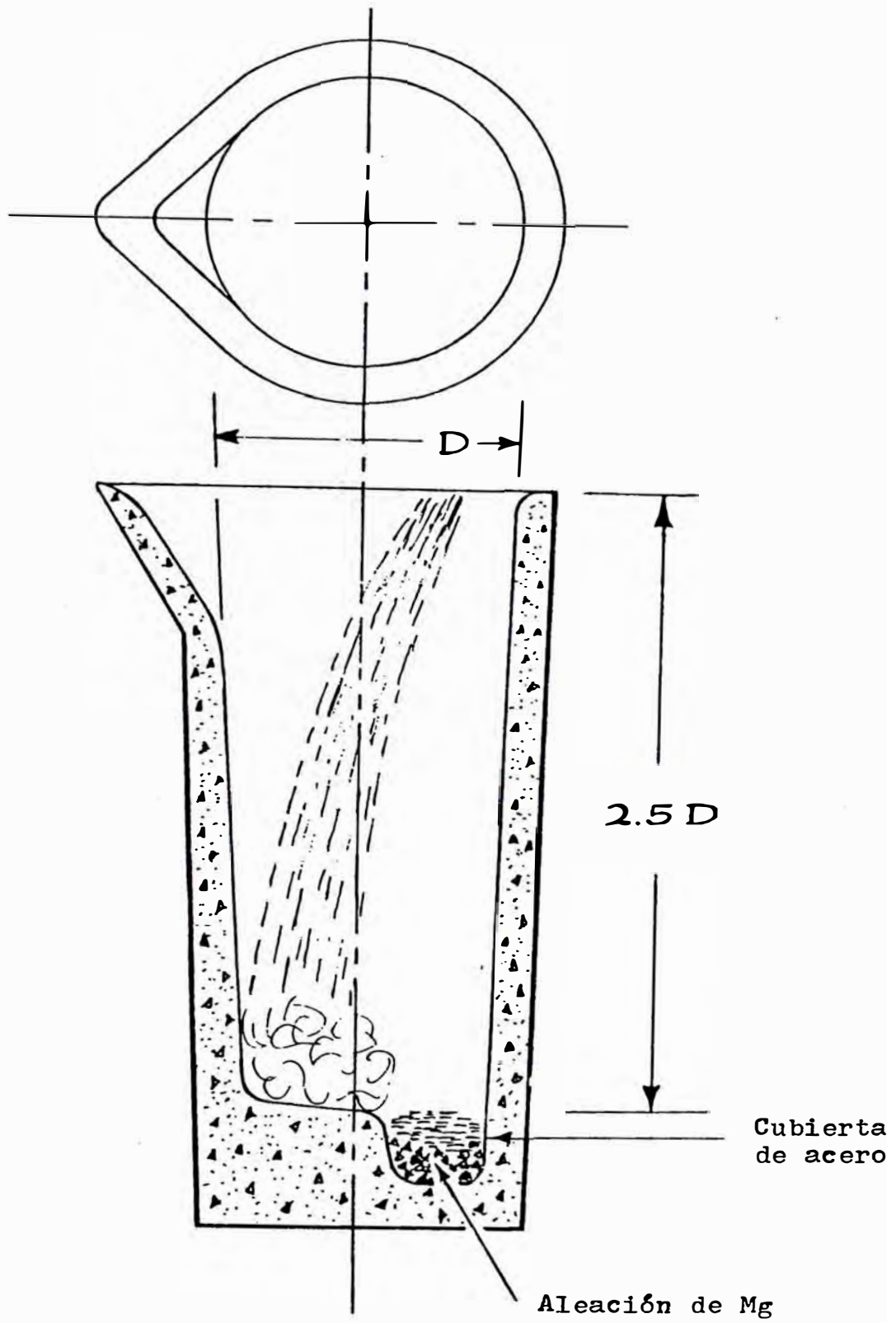


FIGURA 7.4.- Cuchara del tratamiento sandwich.

Además, en vista de que la reacción ocurre debajo de la superficie del metal fundido, existe menor oportunidad para la pérdida del Mg por oxidación que en otros métodos. El resultado final es un fierro tratado con un mayor contenido de Mg por unidad de aleación añadida, con ninguna pérdida mayor de temperatura que se producen con otros métodos de adición.

Es importante que las punzonaduras o recortes tengan un espesor en el rango de 1/16" a 1/8", para que ellos tengan poca tendencia a flotar pero aún se fundirán rápidamente en razón de su alta relación de área superficial a volumen y crearán el gradiente de temperatura requerido en el área de reacción, tan rápidamente como sea posible. La cantidad usada cuando las pérdidas de temperatura deben minimizarse, esta entre 1.5% y 2.0% del fierro a ser tratado.

También es muy importante el tamaño de la aleación de tratamiento, en el método sandwich. Es ideal un tamaño uniforme en el rango de 1" x malla 8. Tamaños mayores reaccionan demasiado lentamente y pueden causar excesiva turbulencia posterior en la reacción, mientras que los finos reaccionan demasiado rápido y se queman antes que se acumule suficiente metal en la cuchara de tratamiento.

Las aleaciones de ferrosilicio magnesio que dan las recuperaciones de Mg más altas, con el método sandwich son Noduloy 5C y 5R. Estas 2 aleaciones cuando se usan sobre una producción base dan recuperaciones de Mg de hasta 60%, debido a sus velocidades de reacción relativamente lentas.

Pueden ser eficientemente utilizadas temperaturas del fierro base de 1,480 °C a 1,540 °C. Tamaños de tratamiento en el rango de 5,000 lbs. resultan en una mínima pérdida de calor. Tratamientos que están debajo de 1,000 lbs no son, usualmente prácticos para usarse en la producción de piezas, a causa de las pérdidas en la temperatura del metal en el tratamiento.

Un resumen de un tratamiento típico con el método sandwich, es como sigue:

- Composición química del fierro base:

3.96 %C; 1.05 %Si; 0.31 %Mn; 0.024 %S; 0.027 %P

- Datos del tratamiento:

Materiales añadidos en la cuchara de tratamiento

Noduloy 5C	130 lbs.
Cubierta de acero	150 lbs.
Fierro base	5,000 lbs.

Inoculación.- 30 a 40 lbs. de FeSi al 75% con Ca, añadido en la cuchara de vaciado después del tratamiento.

Composición del metal tratado con un típico método sandwich:  
3.82 %C; 2.60 %Si; 0.32 %Mn; (a) 0.045 %Mg; 0.004 %S;  
0.030 %P

(a) La recuperación del Mg para el tratamiento de un fierro base fundido en un horno de inducción sin núcleo, es 43%.

- Procedimiento para el tratamiento sandwich:

- 1.- Añadir la aleación de Mg dentro de la depresión de una cuchara de tratamiento limpia a no menos de 1,200 °C.
- 2.- Colocar la cubierta de acero encima de la parte superior de la aleación en la depresión.
- 3.- Llenar la cuchara tan rápidamente como sea posible, sin interrupciones.
- 4.- Retirar la escoria de la superficie del metal, luego que se complete la reacción de la aleación.
- 5.- Inocular a medida que el metal tratado es transferido a las cucharas de vaciado.

3) METODO DEL EMBOLO.- Fue la primera mejora importante en las técnicas del proceso de la fundición nodular, después que se desarrolló el método sobre el vaciado. El método del émbolo es muy versátil y puede usarse en combinación con un número considerable de materiales de tratamiento con Mg. Las eficiencias de la recuperación del Mg de una serie de aleaciones que pueden usarse en este método, se presentan en la Tabla 7.2.

Las temperaturas de tratamiento empleadas en esta Tabla, son de tratamientos realizados en el rango de 1,510 °C a 1,540 °C.

Todos los materiales de tratamiento presentados en la Tabla 7.2, se usan en la producción comercial de fundición nodular. Cada uno de estos se ha asociado largamente con los requerimientos de una fundi-

ción individual. Ningún material de tratamiento es adecuado para todas las condiciones. Los factores que gobiernan el uso de un material dado de tratamiento usado en el método del émbolo, son los siguientes:

- Contenido de S en el fierro base.
- Contenido de Si en el fierro base.
- Eficiencia de la recuperación del Mg.

TABLA 7.2.- ALEACIONES DE Mg USADAS EN EL METODO DEL EMOLO

Tipo	Mg	Si	Ni	Ce	Fe	Recuperación del Mg, %
Incomag 1	16		Resto			60-70
Incomag 2	16	35	50		Resto	45-55
Noduloy 9-C	9	50		0.7	Resto	45-55
Aleación N° 55	30				Resto	40-45
Ferromag	15				Esponja de Fe	40-45
Magnesio Coque	45					18-25

En el método del émbolo, una plancha de metal con un paquete conteniendo un material de tratamiento del Mg, es forzado debajo de la superficie de una cuchara de fierro base y sumergido hasta que todo el Mg presente haya reaccionado con el fierro. Para el tratamiento de 4,000 lbs. se requiere un tiempo normal de reacción de 60 a 90 segundos. Cuando se tratan grandes cantidades de metal de 5 a 10 tons., la reacción del tratamiento es prolongada.

El método del émbolo es de 30% a 50% más eficiente que el método sobre el vaciado. Este aumento en eficiencia se debe, principalmente, a la distancia que el vapor de Mg debe elevarse a través del fierro fundido. De este modo, se produce una limpia del metal conteniendo óxido de Mg. La reacción entre el fierro y magnesio está contenido en el metal resultando en menos humos, destellos, metal esparcido y peligro para el personal de operación. Con pocas excepciones, el método del émbolo requiere instalaciones con inversiones relativamente pequeñas. Los costos de operación dependen grandemente de la vida de la campana de inmersión. Este método es con mucho el más consistente de cualquier procedimiento de tratamiento. Los resultados son fácilmente reproducibles y

no dependen de la velocidad de vaciado del personal de operación. El mé

todo del émbolo puede adaptarse fácilmente a cualquier fundición de alta producción.

Sin embargo, el proceso tiene un número de desventajas. El tamaño del tratamiento es limitado a un tamaño standard y no es tan flexible como algunos de los otros métodos. Las pérdidas de temperatura son mayores cuando se tratan baños pequeños. Además, el proceso no es práctico excepto en producción continua donde la campana del émbolo y la cuchara no se dejan enfriar. Las Figuras 7.5 y 7.6 son dibujos esquemáticos de equipos típicos de émbolo. La Figura 7.5, presenta una cuchara

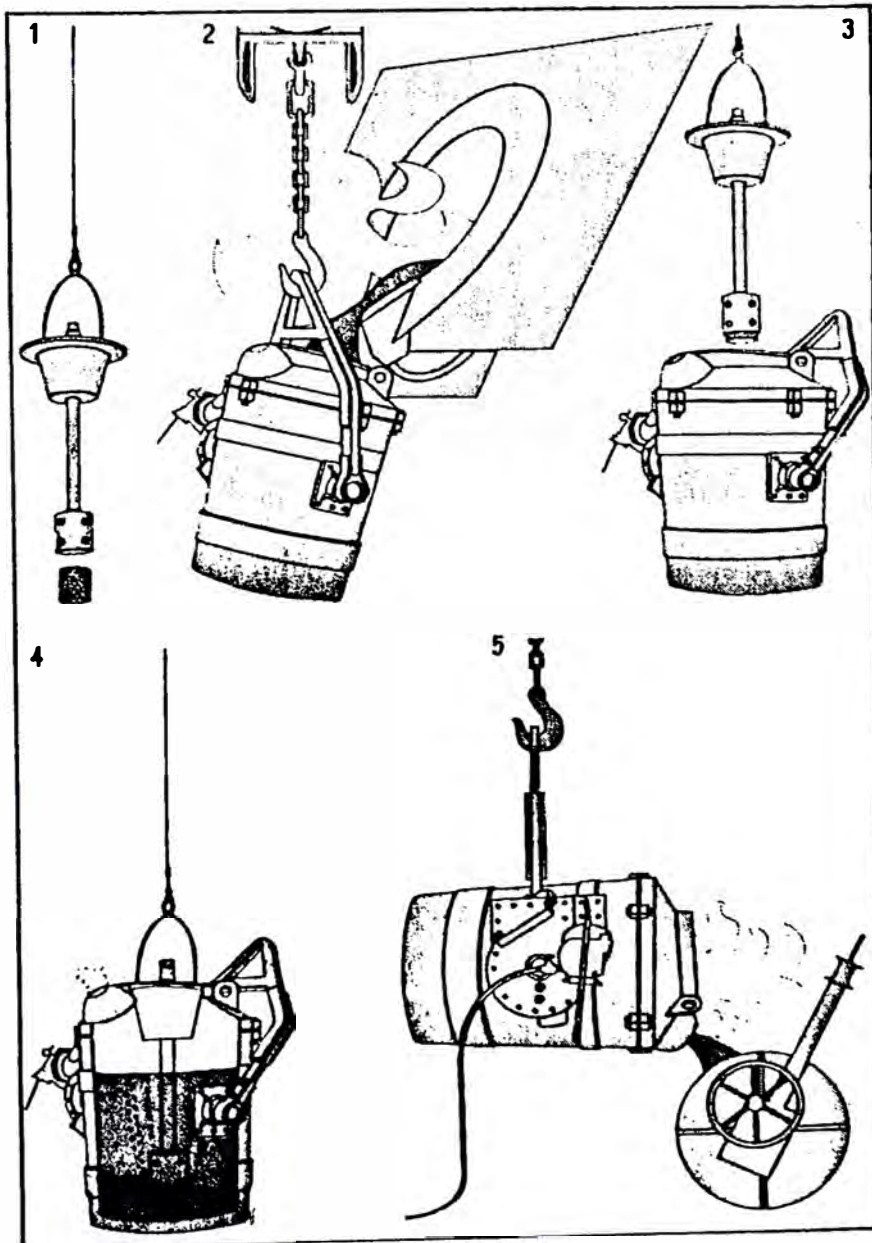


FIGURA 7.5.- Cuchara de émbolo semi-presurizada.

de émbolo semi-presurizada usada en Alemania. Esta cuchara aumenta la recuperación del Mg, aproximadamente en 15% por encima de la recuperación obtenida en una cuchara de émbolo convencional.

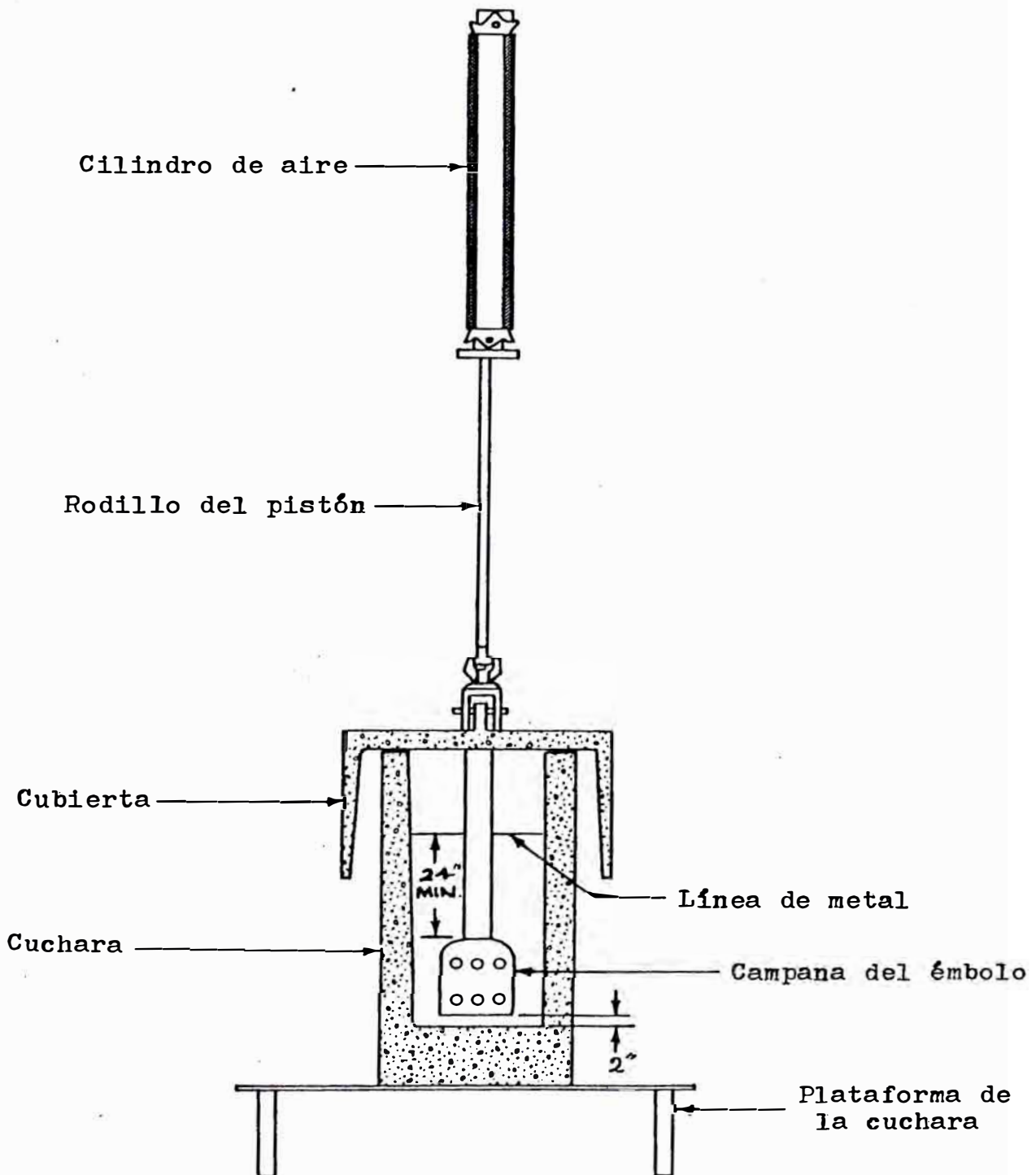


FIGURA 7.6.- Típica cuchara de émbolo, usada en la producción de fundición nodular.

- CUCHARA DE EMBOLO.- Para establecer una buena práctica, es muy importante la selección de un adecuado tamaño de la cuchara de émbolo. El tamaño del tratamiento es largamente dependiente de la velocidad de fusión, facilidad de manipuleo del metal y el peso de la pieza a ser vaciada. Es casi una necesidad, un antecrisol caliente o un horno de conservación de inducción de canal, si se mantendrán consistentes temperaturas de tratamiento.

Para el método del émbolo se requiere una cuchara alta y delgada, por 2 razones. Primero, la altura extra es necesaria para permitir el desplazamiento del émbolo y la acción de ebullición que tiene lugar en la cuchara. Luego en la operación, la cuchara de émbolo se llena de 1/3 a 2/3 del total. Segundo, la recuperación del Mg depende fundamentalmente de la distancia vertical a través de la cual el vapor de Mg debe ascender durante su paso por entre el fierro fundido. Por lo tanto, mientras mayor sea la distancia tanto mayor será la recuperación del Mg. Una cuchara práctica eficiente es aquella con una altura de 2 veces el diámetro interno de la cuchara.

- REVESTIMIENTO DE LA CUCHARA.- Se sugiere un revestimiento de la cuchara, neutral con 90% de alúmina y grafito apisonado, por 2 razones. Los revestimientos ácidos son atacados por la escoria básica de óxido de Mg producida en la reacción de tratamiento. A medida que el revestimiento se erosiona, disminuye el diámetro interno de la cuchara de tratamiento y decrece la profundidad del fierro. A medida que decrece la profundidad del fierro, así también disminuye la recuperación del Mg, por la razón previamente establecida. Además, la reacción entre un revestimiento ácido y una fundición nodular de naturaleza básica, a menudo resulta en una amplia variación en la recuperación del Mg. Todo esto tiende a hacer más dificultoso el control del proceso.

- TAPA DE LA CUCHARA.- La principal función de la tapa de la cuchara es mantener hacia abajo el montaje del émbolo y la aleación de Mg. No es para formar un sello hermético a fin de que aumente la presión. En efecto, la parte superior del revestimiento de la cuchara debe ser desigual para prevenir un aumento en la presión.

Para asegurar una adecuada performance, la tapa de la cuchara

debe pesar entre  $1/3$  y  $1/2$  del peso de metal a tratarse. Si se usan cilindros hidráulicos o de aire para bajar la campana y la tapa, estos pueden usarse para mantener la tapa en su lugar.

La superficie inferior de la tapa debe revestirse con 1 o 2" de refractario. La capa de refractario permitirá a la tapa calentarse uniformemente, de este modo se previene el alabeo y las rajaduras. Esto es importante en vista de que el cilindro de aire o elevador debe estar conectado a la tapa.

Como un factor de seguridad, un borde revestido con refractario, hecho de acero de  $3/16$ " a  $1/4$ " y de 12" a 20" de profundidad, debe conectarse a la tapa. El propósito del borde es producir que cualquier metal expelido o chispeado caiga sin ocasionar daño a toda la cuchara de tratamiento. En vista de que el borde actúa solamente como un deflector, se sugiere que exista varias pulgadas de luz entre el diámetro externo de la cuchara y el borde.

La tapa para la cuchara de émbolo semi-presurizada, se hace de fierro fundido con un alma de refractario con un agujero central para el eje del émbolo de la campana. Esta tapa semejante al tapón con corcho debe tener bastante luz para precaver la expansión del fierro fundido cuando este se calienta en el ciclo de tratamiento.

- VELOCIDAD DE INMERSION Y MECANISMO DEL EMBOLO.- Se sugiere una velocidad de inmersión del émbolo de 12 a 15 pulg/seg. Velocidades de inmersión demasiado lentas permitirá que la reacción comience antes que el émbolo esté completamente hacia abajo. Esto es peligroso para el personal de operación. También, se desperdicia el Mg, en vista de que se reduce la recuperación del Mg. Una velocidad de inmersión extremadamente rápida, reducirá la vida del émbolo de la campana, debido al impacto de la campana y la aleación, al golpear la superficie del fierro.

La selección de los componentes del mecanismo del émbolo depende principalmente de la distribución y equipos existentes en la fundición. A continuación, se presenta las descripciones de varios tipos de mecanismos de émbolo.

Cilindros de aire o hidráulicos.- El cilindro de aire o hidráulico, por lo general se conecta directamente a



una viga o a alguna parte de la estructura de la fundición. En tales instalaciones la cuchara de émbolo se traslada a la posición bajo el émbolo por medio de un carro operado eléctricamente sobre un carril. Diseñando la instalación para conectar rígidamente el cilindro a la estructura, el peso de la tapa puede reducirse en una cantidad igual a la fuerza hacia abajo aplicada al cilindro. Este método de operación del mecanismo, ha sido probado muy satisfactoriamente y se usa en la mayoría de casos.

**Elevadores de aire y eléctricos.-** En general, los elevadores de aire y eléctricos se aplican a instalaciones de émbolo para tratamientos de 2,000 lbs. o menos. Estos mecanismos, usualmente, se conectan a un monorriel o pico de una guía a fin de que el émbolo pueda moverse a un punto por encima de la cuchara pre-posicionada.

**- CAMPANA DE INMERSION.-** Las campanas de inmersión están sometidas a condiciones de operación extremadamente severas, choque térmico, impacto y erosión están involucrados. La campana de inmersión es un artículo que se consume y debe reemplazarse cuando se gasta. Su expectativa de vida depende fundamentalmente del cuidado con que estas son usadas.

Las campanas producidas comercialmente son fácilmente disponibles de un número de fuentes. Las campanas se hacen de refractario de grafito con arcilla de alta alúmina. Usualmente, la vida de estas campanas es de 50 a 100 sumergidas. La escoria y los óxidos tienden a adherirse al refractario de la campana. A menos que se eliminen, la escoria y los óxidos llenarán los agujeros en la campana de tal forma que el vapor de Mg no puede escapar con suavidad.

Algunas fundiciones fabrican sus propias campanas de inmersión, cubriendo una malla de alambre o una forma de metal expandido, con una mezcla refractaria. La vida de las campanas construidas en esta forma, depende principalmente de la habilidad del fabricante. Aún cuando, se obtienen en algunos casos de 40 a 70 sumergidas con una simple campana.

Existe una amplia variación en la vida de la campana de inmersión, dependiendo del cuidado que se le da a la campana por el personal

de operación. A continuación, se dan algunas sugerencias para ayudar a aumentar la vida de la campana de inmersión, con lo cual se contribuye a reducir los costos de tratamiento:

- Precalentar la campana a un color rojo brillante, previo a su uso, para reducir el efecto del choque térmico así como reducir las pérdidas de temperatura en el fierro. Manteniendo una campana caliente durante las sumergidas, se duplicará la vida.
- La escoria y metal adherido deben removerse cuando la campana está caliente, en vista de que el refractario caliente puede soportar mejor el choque mecánico de eliminar la escoria. La eliminación de la escoria ayuda a reducir los gradientes térmicos, de este modo se reducen los esfuerzos en la campana.

A menudo, se usa un lento enfriamiento en las campanas de inmersión, para reducir las tensiones que originan rajaduras y prolongar la vida de la campana.

- AJUSTES EN LA PROFUNDIDAD DEL EMBOLO.- El extremo inferior de la campana de inmersión o la envoltura o "lata" de la aleación, cualquiera es más largo, deben estar aproximadamente 2" por arriba del fondo de la cuchara de émbolo. Permitiendo el contacto con el fondo de la cuchara puede retardarse el inicio de la reacción y también prolongar la reacción.

Cuando se diseña el equipo del émbolo, se sugiere que sea incorporado un resorte sobre la barra, manteniendo el manguito de la campana del émbolo contra la tapa. El propósito del resorte es hacer fácilmente los ajustes en la profundidad del émbolo y amortiguar la expansión y contracción térmica de la barra, sin presentar indebidos esfuerzos sobre la campana o manguito refractario que cubre la barra. El resorte también absorbe algo del impacto resultante del choque de la campana sobre la superficie del fierro líquido.

- ENVOLTURAS O LATAS DE LA ALEACION.- Puede usarse para contener los materiales del tratamiento con Mg, cualquier tipo de plancha delgada de acero que no contenga nada de soldadura. En ciertos casos los materiales de tratamiento son envueltos en chapas preformadas de acero u hojas muy delgadas de acero, compactos. Estas formas se han reportado como menos costosas que las latas. Otra

forma, es mantener las briquetas de Mg en su lugar con una barra de acero colocada debajo.

- MECANISMO PARA COLOCAR LOS MATERIALES DEL TRATAMIENTO CON Mg EN LA CAMPANA DE INMERSION CALIENTE.- No solamente la colada sino el peso del material de tratamiento y el recipiente a colocarse en la campana hacen necesario un sistema de cargado mecánico. A continuación, se da una lista de diversos mecanismos y recomendaciones para su uso.

El sistema de cargado del tipo de cilindro de aire es el más popular, en vista de que es el más rápido, de fácil instalación y sólo requiere un hombre para la operación de cargado.

- El sistema de cargado del tipo palanca es satisfactorio para operaciones de pequeña producción, pero no se recomienda en operaciones de alta producción.

El colocado de la aleación en lata sobre un pilar bajándose luego la campana de inmersión sobre la lata, es otra forma que a veces es empleada.

- PROCEDIMIENTO GENERAL DEL METODO DEL EMBOLO

- 1.- Precalentar la cuchara de émbolo y la campana a casi 1,200 °C.
- 2.- Colocar una lata del material de tratamiento, pesado, en la campana de émbolo y asegurarlo con clavos.
- 3.- Llenar la cuchara de émbolo con una cantidad pesada de fierro a una temperatura adecuada para fabricar buenas piezas.
- 4.- Introducir dentro del fierro el émbolo con la campana de inmersión conteniendo el material de tratamiento.
- 5.- Mantener el émbolo en el fierro por un tiempo predeterminado y luego retirarlo. Usualmente, la cuchara detenida vibra cuando se completa la reacción.
- 6.- Retirar la escoria de la cuchara de émbolo.
- 7.- Es necesario limpiar la campana de inmersión y esta debe mantenerse caliente para el siguiente tratamiento.

4) METODO DE INYECCION.- Como originalmente se intentó, el proceso de inyección consiste de 2 etapas: desulfurización y el tratamiento de nodulización. La etapa de desulfurización consiste de la inyección de carburo de Ca dentro del fierro fundido usando

el nitrógeno como un vehículo. Para la producción de fundición nodular, se inyecta dentro del metal perdigones finos de Mg metálico, tal como se indica en la Figura 7.7.

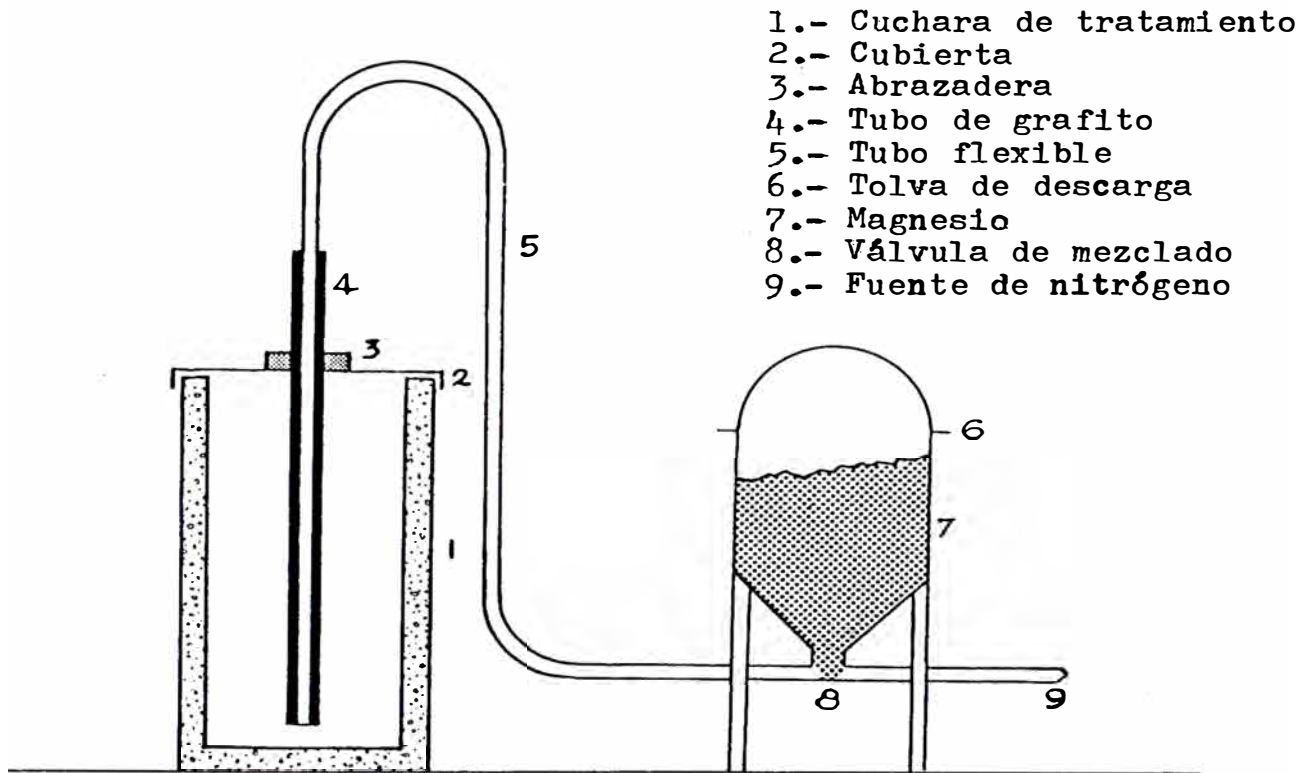


FIGURA 7.7.- Equipo de inyección.

5) METODO DE LA CAMARA DE PRESION.- En el método de la cámara de presión, la cuchara de tratamiento se coloca en una cámara sellada y se aumenta la presión en la cámara hasta casi 30 atmósferas. Luego, el Mg metálico es sumergido dentro del hierro fundido en la cuchara de tratamiento. Mientras la presión se mantiene en la cámara, el Mg metálico se mezcla íntimamente por una poderosa agitación. Se ha reportado recuperaciones del Mg de 70% a 80%. En este proceso el hierro es sobretratado a propósito y diluido a los niveles normales de Mg, ver la Figura 7.8.

El proceso es muy flexible y puede usarse en el tratamiento de una gran variación en las cantidades de hierro base. Además, el uso de Mg metálico elimina la introducción de cantidades innecesarias o indeseables de Si en el hierro. La habilidad para desulfurizar así como tratar el metal fundido con Mg, ha hecho posible el uso de un hierro base gris para la producción de fundición nodular.

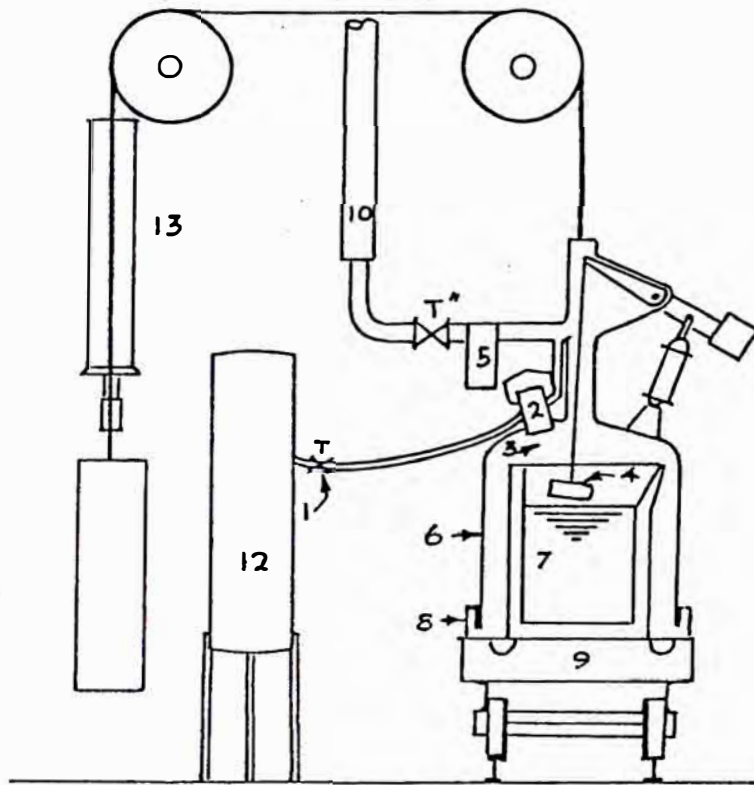


FIGURA 7.8.- Cámara de presión

- |  |   |
|--|---|
| 1.- Válvula de aire                          | 8.- Mordaza de sellado circular                               |
| 2.- Reservorio de lingote de Mg              | 9.- Base  |
| 3.- Válvula de entrada del Mg                | 10.- Tubo de escape   |
| 4.- Agitador                                 | 11.- Válvula de escape  |
| 5.- Filtro de polvos                         | 12.- Reservorio de aire comprimido a 30 atmósferas de presión |
| 6.- Recinto bajo presión de 15-20 atmósferas | 13.- Cilindro hidráulico a cámara abierta                     |
| 7.- Cuchara                                  |   |

Las desventajas del proceso de inyección son: una gran pérdida de temperatura mayor que en otros métodos, sumergidas intermitentes del tubo inyector y recuperaciones erráticas de Mg. Por estas razones, y el alto costo de los perdigones de Mg, el método de inyección nunca ha recibido una amplia aceptación por la industria de la fundición.

El proceso ha recibido solamente una aceptación limitada debido a la naturaleza compleja del equipo de tratamiento y los muchos problemas de mantenimiento asociados con su uso. Este método fue desarrollado por Pont-a-Mousson, un fabricante de tuberías en Francia y un sistema similar conocido como el Proceso Kabota, es usado en Japón.

6) METODO DE LA CUCHARA SELLADA.- Este proceso es un sistema moderadamente complejo, el cual fue desarrollado en Alemania por Schuchterman y Kemer-Baum, A. G. En este método la cuchara de tratamiento o vaso es usado como una cámara de presión. La tapa del vaso, como se indica en la Figura 7.9, se combina con una barra de émbolo que sumerge un lingote de Mg fundido en un tubo de acero. El propósito del tubo de acero el cual esta abierto en el fondo, solamente es para forzar al vapor de Mg a la máxima profundidad antes que empiece a burbujear a través del fierro.

El tiempo de tratamiento requerido en este proceso es de 1 1/2 a 2 1/2 minutos y 3.3 lbs. de Mg por cada ton. de fierro tratado. Como una regla general el fierro es sobretratado y diluido tan alto como una base de 4 a 1.

Este proceso no ha encontrado amplia aceptación en los E.E.U. U., debido a las muchas etapas involucradas en el proceso y la dificultad de un correcto sellado de la cuchara de tratamiento.

7) METODO DEL TAPON POROSO.- El método del tapón poroso está en uso en todas las ciudades actualmente y ha sido muy aceptado. Generalmente, se usa como una combinación del proceso para desulfurización y nodulización con una práctica de fusión en cubilote ácido. Debido a las pérdidas de calor, este método no es satisfactorio para la desulfurización y nodulización del fierro usado para piezas de secciones livianas fundidas en maquinas moldeadoras o tuberías sin sobrecalentamiento intermedio en un horno eléctrico antes del tratamiento final. Sin embargo, en donde las piezas de secciones gruesas pesando

- 1.- Lingote de Mg en tubo de acero.
- 2.- Barra cubierta con refractario.
- 3.- Cuchara de presión.
- 4.- Tapa de la cuchara de presión.
- 5.- Empaquetadura de sellado.
- 6.- Cabezal de sellado.
- 7.- Barra de presión.
- 8.- Cilindro hidráulico.
- 9.- Unidad de potencia hidráulica.
- 10.- Cámara de tratamiento.

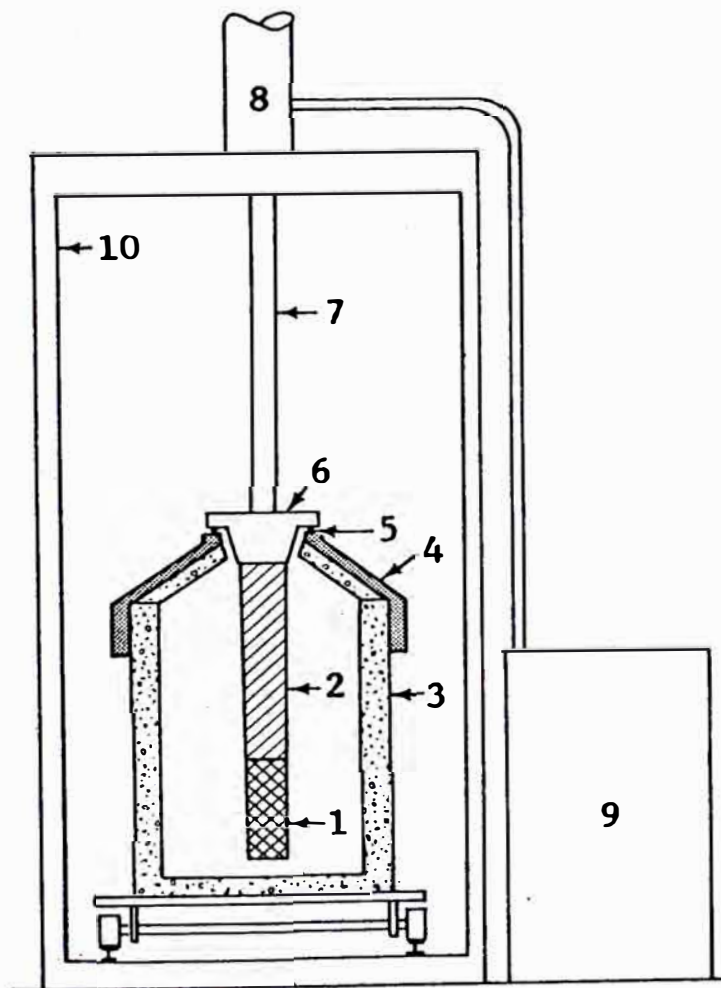


FIGURA 7.9.- Cuchara de sellado.

1,000 lbs. o más y temperaturas de vaciado en el rango de 1,370 °C pueden ser tolerados, el método ha sido probado muy satisfactoriamente.

El método del tapon poroso de producción de fundición nodular esta basado sobre un método de agitación del metal por la inyección de nitrógeno a través de un tapón refractario poroso localizado en el fondo de una cuchara o artesa. El crédito para este desarrollo es reclamado por la British Cast Iron Research Association y por J. Galey de L' Air Liquide, Francia. Por esta razón, nunca se otorgó una patente en Inglaterra.

- PRINCIPIOS DE AGITACION DEL TAPON POROSO.- La producción de fundición nodular requiere un tratamiento que involucre la introducción de aleaciones de Mg o materiales magnesíferos dentro del fierro fundido. La adición y mezclado de estos materiales en el baño metálico implica ciertas dificultades. La primera es debido al hecho que la temperatura de vaporización del Mg es 1,105 °C. Por esta razón, parte del Mg usado en cualquier tratamiento se vaporiza y se quema. La segunda es que debido a que el Mg es un potente agente desulfurizante y, por lo tanto, reacciona con el S contenido en el fierro fundido que se está tratando. Solamente el remanente del Mg actuará como un agente nodulizante. Esta doble pérdida de Mg explica la necesidad para la adición de una cantidad mucho mayor de Mg que la requerida teóricamente.

En vista del hecho que el S neutraliza al costoso Mg, es deseable una desulfurización previa a la adición de Mg, usando un desulfurante menos costoso. La desulfurización preliminar ofrece 2 ventajas:

- 1.- Ahorro de los materiales del tratamiento con Mg y permite la adición precisa del agente nodulizante a un baño bien desulfurado para producir el efecto nodulizante deseado.
- 2.- Un exceso de Mg con el fierro producirá efectos indeseables muy conocidos tales como la cementita en la estructura de la matriz y pinholes en las piezas.

Dado que existe un número de diferentes métodos de mezclado o agitación del fierro líquido, la mayoría requiere alguna forma de rechareo y, por lo tanto, una considerable pérdida de temperatura. La agitación con un gas inerte tal como el nitrógeno hace posible la desulfu-



rización, un tratamiento de nodulización y la inoculación, todo en la misma cuchara con una mínima pérdida de temperatura. Se ha encontrado que inyectando tal gas a través de un tapón poroso localizado sobre el fondo de la cuchara, el paso de burbujas de gas muy pequeñas dentro del líquido crea un movimiento general vertical con corrientes por arriba y por abajo que agitan el metal líquido en la cuchara. Esto se ilustra en la Figura 7.10.

Si un agente desulfurante de peso relativamente liviano tal como el carburo de Ca o un agente nodulizante pesado tal como el FeSi con Mg, es arrojado sobre la superficie arremolinada del líquido en movimiento, parte del agente serán llevados hacia abajo alrededor del fondo de la cuchara mientras que el líquido fresco se pone en contacto con el material remanente sobre la superficie.

Este efecto puede producirse por una velocidad del flujo de gas relativamente baja. Por ejemplo, puede obtenerse una fuerte agitación en una cuchara de 40 ton. con 26 pies<sup>3</sup> de nitrógeno por minuto o 5 pies<sup>3</sup> de nitrógeno por minuto para una cuchara de 1 ton. Teniendo en cuenta que el tiempo de inyección dura de 3 a 7 minutos, el consumo de nitrógeno requerido para la agitación varía de 6.5 a 26 pies<sup>3</sup> por ton. de metal tratado. El efecto del enfriamiento debido a la acción específica del gas es pequeño, a causa de que la masa de gas inyectado es muy pequeña comparada a la masa de metal líquido tratado. La caída de la temperatura experimentada es mayormente debido a las pérdidas de radiación, proporcional a la duración del tratamiento. Esta pérdida es mayor para una pequeña cuchara que para una grande, sin embargo, las pérdidas son aún aceptables en cucharas tan pequeñas como 1,000 lbs. Con una mínima inversión, el proceso de inyección de gas a través del tapón poroso, permite completar sucesivamente en la misma cuchara la serie de tratamientos requeridos, es decir, una completa desulfurización, recarburización, nodulización e inoculación. El proceso puede emplearse en cucharas de cualquier capacidad, de 1,000 lbs. a 40 tons. o más. Puede obtenerse una buena fundición nodular, por ejemplo, con fierros fundidos en cubilote ácido, aún en pequeñas cucharas de 1,000 lbs. de capacidad.

- EL EQUIPO.- El proceso puede operarse en todas las cucharas convencionales prescindiendo de su capacidad, revestimiento (ácido o básico, mezcla apisonada o ladrillo de trabajo) o forma. Los

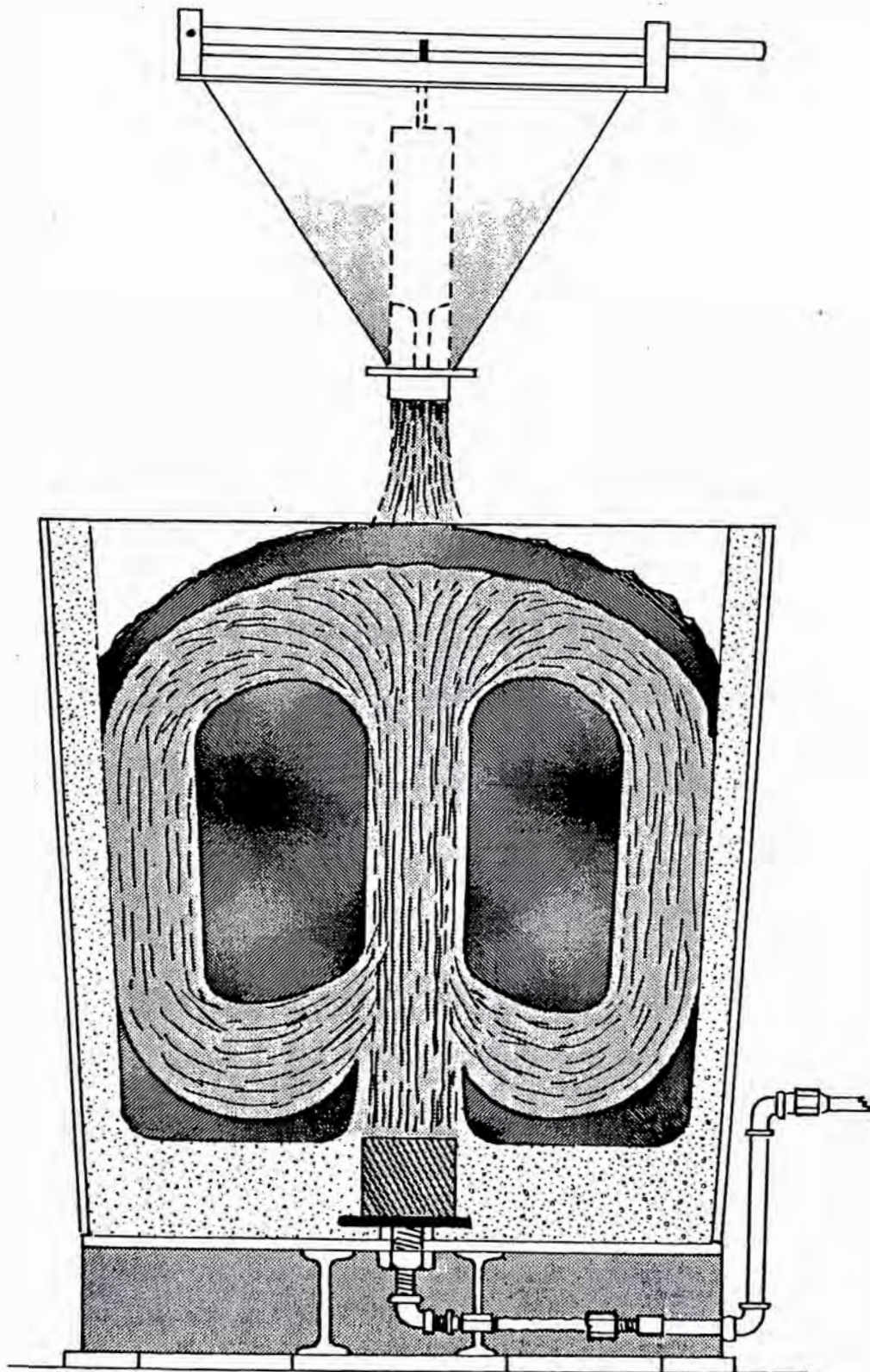


FIGURA 7.10.- Instalación del tapón poroso en una cuchara con fondo re-  
forzado.

tapones porosos se encuentran disponibles en tamaños standard de 2 proveedores. Estos se hacen de tamaños precisos con partículas de alúmina pura, moldeados en prensa, secados y quemados a alta temperatura. Los tapones son capaces de una operación sostenida a temperaturas de 1,820 °C o más. Los materiales refractarios porosos usados en los tapones porosos son suficientemente permeables a los gases, sin embargo, impermeable al metal líquido, aún cuando el gas no esté inyectándose. La Figura 7.11, es un ejemplo de un tapón poroso comercialmente disponible.

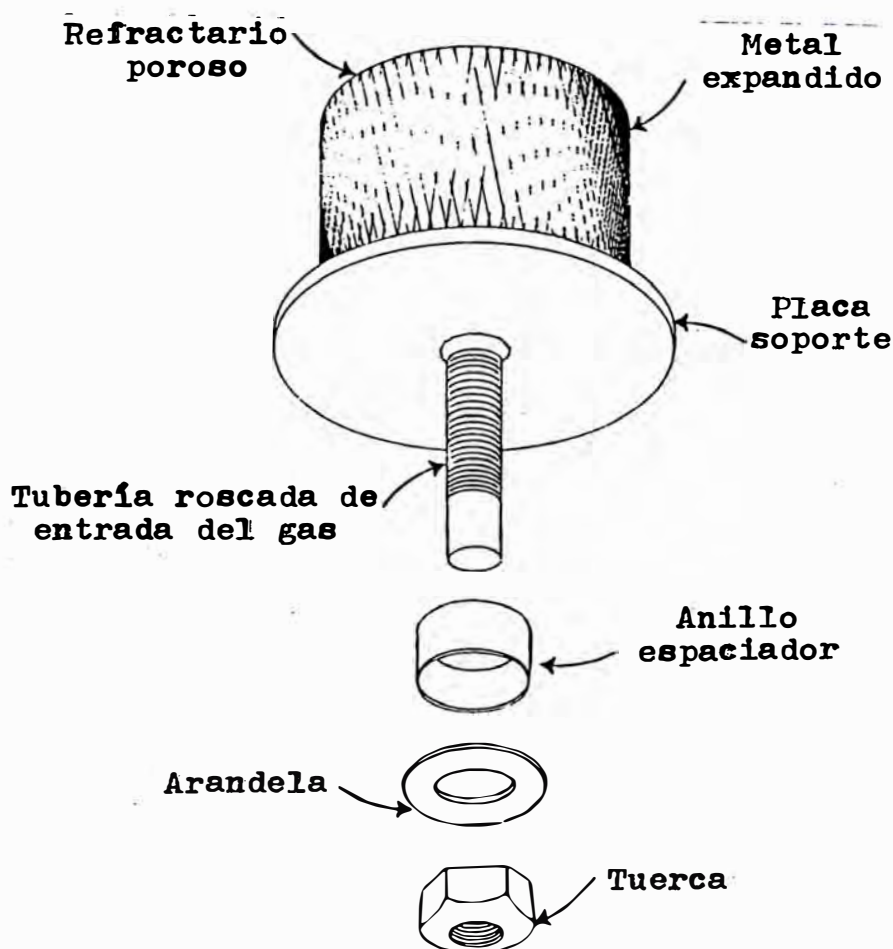


FIGURA 7.11.- Tapón poroso.

Dependiendo de la capacidad de la cuchara, uno o más tapones porosos pueden instalarse en el fondo de la cuchara reforzado rígidamente. Una instalación típica se presenta en la Figura 7.10.

Un simple tapón poroso puede proporcionar un eficiente mezclado en cucharas de 1,000 a 6,000 lbs. Se requieren instalaciones de múltiples tapones para grandes cucharas. Deben instalarse suficientes tapo

nes en las cucharas de tratamiento para suministrar una vigorosa turbulencia a través del área superficial del metal líquido.

Para grandes cucharas, se requieren a menudo 2 o 3 tapones porosos. Estos tapones deben instalarse para que la cuchara completa sea agitada efectivamente y el metal debe moverse desde el fondo de la cuchara a la superficie, muy rápidamente. Cada tapón debe tener un regulador separado y una fuente de nitrógeno. Además, los tapones porosos deben sellarse sobre los lados con un cemento líquido a alta temperatura y secado en un horno a 204 °C antes que se coloquen en el fondo de las cucharas de tratamiento revestidas con ladrillo o refractario apisonado. Es muy importante evitar las fugas de gas.

El gas fluye desde la fuente de nitrógeno comprimido a través de un regulador de presión, un medidor de flujo, un manómetro y una manguera flexible equipada con un acople rápido a la tubería que alimenta el tapón o los tapones porosos, Figura 7.12. El gas del tratamiento de la cuchara puede ubicarse convenientemente cerca al horno.

La permeabilidad de los tapones porosos se diseñan para caídas de presión de 1 a 3 atmósferas. La inyección puede interrumpirse o reanudarse sin inconvenientes y la cuchara de tratamiento puede usarse además, para el vaciado.

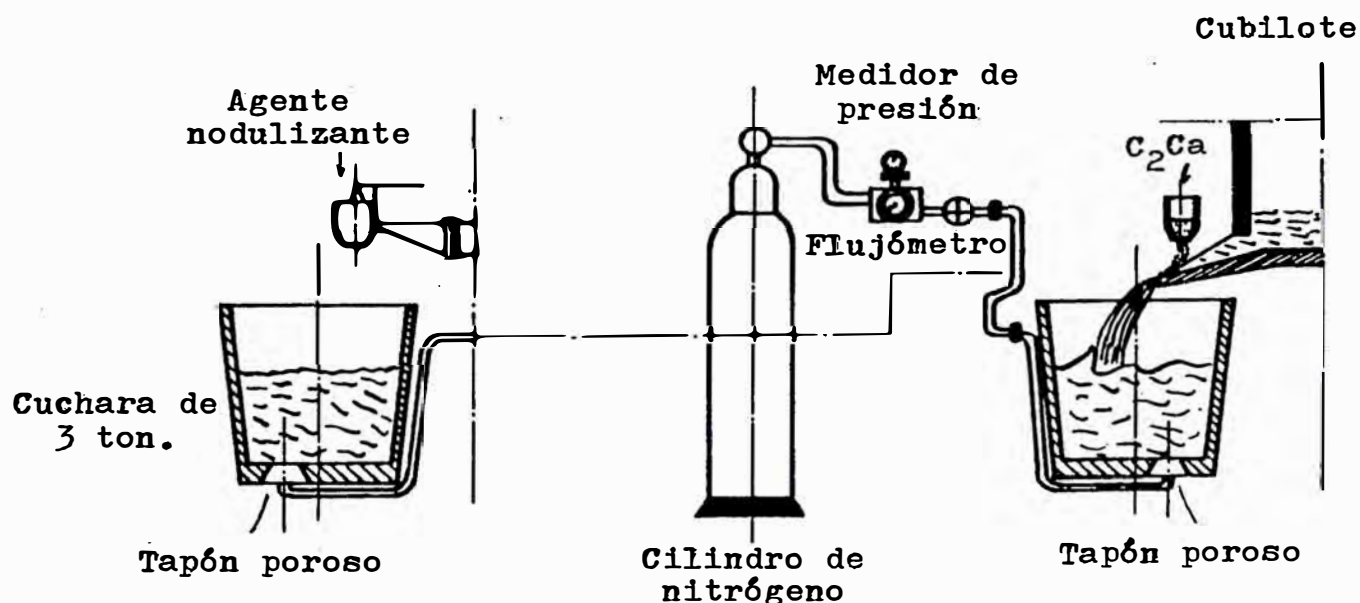


FIGURA 7.12.- Disposición general de una instalación de inyección.

- MODO DE OPERACION.- El modo de operación es prácticamente el mismo para todos los hornos (cubilote ácido o básico, inducción o arco) y todas las capacidades de las cucharas.

Para la fundición nodular, el baño de metal, por lo general, es sucesivamente desulfurizado, nodulizado y posiblemente recarburizado e inoculado.

a) DESULFURIZACION.- Es aconsejable una previa desulfurización cuando el contenido inicial de S excede de 0.030% a 0.040%. El desulfurante generalmente usado es el carburo de Ca llamado "grado desulfurante" el cual se muele a una adecuada finura. La cantidad de carburo de Ca a introducirse depende del contenido de S y también de la capacidad de la cuchara, debido al hecho de que la eficiencia de la operación es mayor en las cucharas grandes que en las pequeñas.

El carburo de calcio se vacía preferentemente a través de un distribuidor en el canal de sangrado o sobre la superficie del baño, al mismo tiempo que el metal es vaciado dentro de la cuchara. La inyección del gas comienza al mismo tiempo y se continúa por algún tiempo después que la cuchara se ha llenado.

La duración total de este tratamiento, incluyendo el sangrado del metal, es alrededor de 3 minutos para una pequeña cuchara de 330 a 1,100 lbs. o 4 a 5 minutos para cucharas que contienen 1 ton. o más. La desulfurización es, generalmente, seguida de un escoriado que puede ser mejorado por una pequeña inyección de gas.

La Tabla 7.3, presenta los resultados típicos usando el método del tapón poroso, para la desulfurización con carburo de calcio.

b) NODULIZACION.- Después del escoriado, se reanuda la inyección de gas y el agente de nodulización, posiblemente mezclado con un agente de inoculación, se vacía sobre la superficie de la cuchara agitada por medio de un canal de colada, una tolva o, mejor aún, por un distribuidor vibratorio.

La agitación, la cual es más pequeña en este caso que para la desulfurización, dura de 30 segundos a 2 minutos, dependiendo de la capacidad de la cuchara.

TABLA 7.3.- RESULTADOS PROMEDIOS DE DESULFURIZACION

Horno	Capacidad cuchara	%Ca <sub>2</sub> C	Duración tratamiento	% S Inicial	% S Final	Eficiencia % (a)	Observac.
Cubilote A- cido	350 lbs	2.5-3	6 min.	0.082	0.009	89	
Inducción	500 lbs	2.5	3 min.	0.090	0.007	92	
			3 min 30 seg	0.090	0.003	96	
Inducción	800 lbs	1.3	2 min 30 seg	0.075	0.024	68	1.3% Ca <sub>2</sub> C y 2 min y 30 segundos.
Cubilote A- cido # I	1,500 lbs	1.5	3 min.	0.090	0.009	90	
		1.5	4 min.	0.100	0.007	93	
Cubilote A-	1 Ton.	1.5	5 min.	0.100	0.007	88	
				a	a	88	
Inducción	1 Ton.	1.66	7 min 45 seg	0.140	0.016	97	
			5 min 15 seg	0.083	0.002	89	
Cubilote A- cido	3 Ton.	1.0	6 min.	0.061	0.032	48	1% Ca <sub>2</sub> C.
		2.0	5 min.	0.090	0.010	89	
Inducción	6 Ton.	1.15	5 min.	0.081	0.006	67	
Arco	8 Ton.	1.5	5 min.	0.090	0.017	81	
Inducción	11 Ton.	1.5	6 min.	0.068	0.008	88	
Reverbero	20 Ton.	0.8	6 min.	0.028	0.005	82	
Reverbero	25 Ton	1.5	6 min.	0.060	0.011	81.5	

$$(a) \text{ Eficiencia} = \frac{\%S_{\text{inicial}} - \%S_{\text{final}}}{\%S_{\text{inicial}}}$$

La aleación de nodulización o nodulizante no debe contener grandes trozos o finos. Su tamaño de grano debe estar entre  $3/4''$  a malla 8.

Los tipos de aleación empleados son: magnesio níquel o FeSi magnesio con o sin calcio o cerio.

El contenido de Mg no es significativo, aún cuando tiene alguna relación sobre el porcentaje de agente nodulizante a ser añadido al hierro líquido.

Generalmente, una completa agitación permitirá una reducción substancial de la cantidad de aleación añadida. Cuando se usa FeSi conteniendo de 14% a 15% de Mg, es suficiente 0.8% a 1.5% de aleación, dependiendo de la capacidad de la cuchara.

El Mg retenido, esto es, 30% a 60%, dependiendo de la clase de aleación y el peso de metal tratado, usualmente, es mayor que el obtenido con otros procesos. El objetivo es obtener el más bajo contenido de Mg residual consistente con la nodularidad deseada. Los puntos duros se eliminan cuando se obtienen mínimos contenidos de Mg residual. Parece también que la acción específica del nitrógeno retarda la pérdida del efecto nodulizante.

Por otra parte, se reduce considerablemente la formación de óxidos cuando el Mg se añade a un hierro bien desulfurizado. La experiencia industrial también ha mostrado que un flujo de pequeñas burbujas ayuda a decantar los óxidos.

El volumen total de nitrógeno requerido para la desulfuración y nodulización es relativamente pequeño. Esto es de 7 a 10 pies<sup>3</sup> por ton. de metal tratado para cucharas de más de 10 tons., de 14 a 20 pies<sup>3</sup> para cucharas de 1 ton.

La Tabla 7.4, presenta los resultados típicos de tratamientos de nodulización usando aleaciones de FeSi magnesio.

c) RECARBURIZACION.- Los agentes de recarburización, por ejemplo, grafito en polvo, pueden introducirse al fondo de la cuchara antes del sangrado y el mezclado ocurre durante el tratamiento de desulfurización.

TABLA 7.4.- NODULIZACION

Origen del fierro; capacidad cuchara	Cantidad y tipo de agente nodulizante	%S antes del tratamiento	Duración de nodulización	Análisis del fierro final	Estructura	Propiedades Mecánicas de piezas brutas (a)	Observaciones
Cubilote árido Cuchara 350 lbs	1.5-1.75% FeSiMgCaCe Mg=9% Ce=0.5%	Menos de 0.010%	25 a 35 seg.	C = 3.30 Si=2.30 Mn=0.50	Perlítica	R=64.68 a 70.31 A=3 a 6%	Residual Mg=0.020 a 0.025%
				C = 3.50 Si=2.90 Mn=0.20	Perlítica Ferrítica	R=49.92 a 54.84 A=9% medio	El nodulizante se añadió luego de la desulfurización sin escoriarse
Horno de Inducción Cuchara 1,000 lbs	1.7% FeSiMg Mg=14-15%	0.035% sin previa desulfurización	40 seg.	C = 3.59 Si=3.17 Mn=0.34	Ferrítica Perlítica; pieza bruta 75% de ferrita	R=61.87 F=44.29 A=11.1%	Residual Mg=0.043% luego del tratamiento 850 °C 1 hr 720 °C 7 hr R=43.59 F=36.56 A=22.8%
				C = 3.57 Si=3.43 Mn=0.31	Ferrítica Perlítica; pieza bruta 80% de ferrita	R=59.06 F=42.89 A=14.6%	Residual Mg=0.057% luego del tratamiento R=51.32 F=34.10 A=23%
Horno de Inducción Cuchara 1,800 lbs	0.8% FeSiMg Mg=14-15%	0.010%	1 min. 15 seg.	C = 3.46 Si=2.66 Mn=0.30 Ni=0.42	Perlítica	R=73.12 A=5%	Residual Mg=0.035%
Horno de Inducción Cuchara 1 Ton.	1.5% FeSiMg Mg=14-15%	0.02%	50 seg.	C = 3.37 Si=2.60 Mn=0.39	Perlítica	R=64.96 F=54.49 A=1%	Luego del tratamiento R=51.32 F=46.40 A=20%
				C = 3.70 Si=3.05 Mn=0.61	Perlítica	R=65.39 F=57.65 A=2%	Residual Mg=0.035%
Cubilote de aire caliente Cuchara 1 1/2 Ton.	0.53% NiMg	0.025% sin previa desulfurización	35 seg.	C = 3.53 Si=1.86 Mn=0.38	Perlítica	R=73.82 F=61.87 A=1%	Residual Mg=0.040% luego del tratamiento R=52.73 F=42.18 A=22%
Cubilote Cuchara 8 Ton.	1.5% FeSiMg Mg=14-15%	0.020%	3 min.	C = 3.54 Si=2.53 Mn=0.37	Perlítica	R=71.71 F=43.59 A=1.5%	Residual Mg=0.054% 7 min. luego del final del tratamiento
Inducción Cuchara 8 Ton.	1.0% FeSiMg Mg=14-15%	0.017%	2 min. 15 seg.	C = 3.10 Si=0.73 Mn=0.54	Perlítica		Residual Mg=0.030%
Horno de Inducción Cuchara 8 Ton.	1.0% SiMg Mg=14-15%	0.008%	2 min.	C = 3.33 Si=0.77 Mn=0.59 Ni=1.00			Residual Mg=0.100%
Reverbero Cuchara 17 Ton.	1.0% FeSiMg Mg=14-15%	0.010%	4 min.				Residual Mg=0.090%

(a) R = Resistencia a la tracción, en Kg/mm<sup>2</sup> F = Límite de fluencia, en Kg/mm<sup>2</sup>  
A = Alargamiento, en %



Cuando la recarburización se lleva a cabo separadamente, el agente de recarburización se distribuye sobre el baño agitado. El mezclado durará 3 minutos. El C retenido varía de 50% a 80%, dependiendo de la temperatura durante el tratamiento, el contenido inicial de C, la cantidad del agente de recarburización y la duración del tratamiento.

8) PROCESO T-NOCK.- Es un proceso de producción de fundición nodular recientemente desarrollado en Europa por Scientific Research Institute in Delft, Holanda. Esta técnica es parcialmente un proceso de inyección. En la práctica, se coloca una boquilla sobre la cuchara de vaciado. El fierro base fluye a través de la boquilla T-Nock formando un chorro hueco. Las aleaciones de Mg son alimentadas dentro del chorro a través de un tubo. La Figura 7.13, es un dibujo esquemático que presenta el diseño y la configuración general del basín especial de vaciado que está soportado sobre la cuchara de tratamiento. El orificio de salida del basín de vaciado tiene una boquilla de refractario apisonado o ladrillo refractario como se muestra en la figura, dentro del cual se inserta un tubo de carburo de Si. Este tubo se usa para alimentar las aleaciones de FeSi magnesio dentro del chorro hueco de fierro líquido, a medida que este fluye a través de la boquilla. Esta boquilla permite el mezclado de aleaciones sólidas dentro del centro del chorro. Se previene la excesiva reacción con oxígeno en el aire y se obtienen muy buenas recuperaciones de Mg. A menudo, se usa una llama de gas para proteger el chorro de metal y la superficie del metal a medida que este cae dentro de la cuchara de recuperación.

El tamaño normal de tratamiento para el proceso T-Nock es de 1,000 lbs. a 5,000 lbs. Debido a que se puede usar cualquier aleación de FeSi magnesio o magnesio níquel, muchos productores Europeos prefieren una aleación de FeSi con 9 a 10 %Mg similar al Noduloy 9-C. La inoculación con FeSi, usualmente, se incorpora en el procedimiento de tratamiento T-Nock. Una descripción de este procedimiento de tratamiento, es como sigue:

- La cuchara de tratamiento y el basín de vaciado T-Nock, deben precalentarse a por lo menos 1,890 °C.
- Se requiere para el tratamiento una cantidad pesada de fierro base en el rango de temperatura de 1,510 °C a 1,540 °C.

- A medida que el fierro base es vaciado a través del basín de vaciado, el FeSi magnesio en el rango de tamaño de malla 8 a malla 50, se alimenta dentro del chorro de metal a través de un tubo de carburo de Si.
- Una cantidad pesada de FeSi magnesio se alimenta dentro del tubo de carburo de Si, con un alimentador vibratorio. Todas las aleaciones de tratamiento se añaden en los primeros 50% a 70% del fierro base. Se hace una inoculación con FeSi a través del tubo dentro de la última parte del fierro. La posibilidad de usar una aleación de tratamiento que no requiera inoculación, debe considerarse en el caso del Proceso T-Nock.

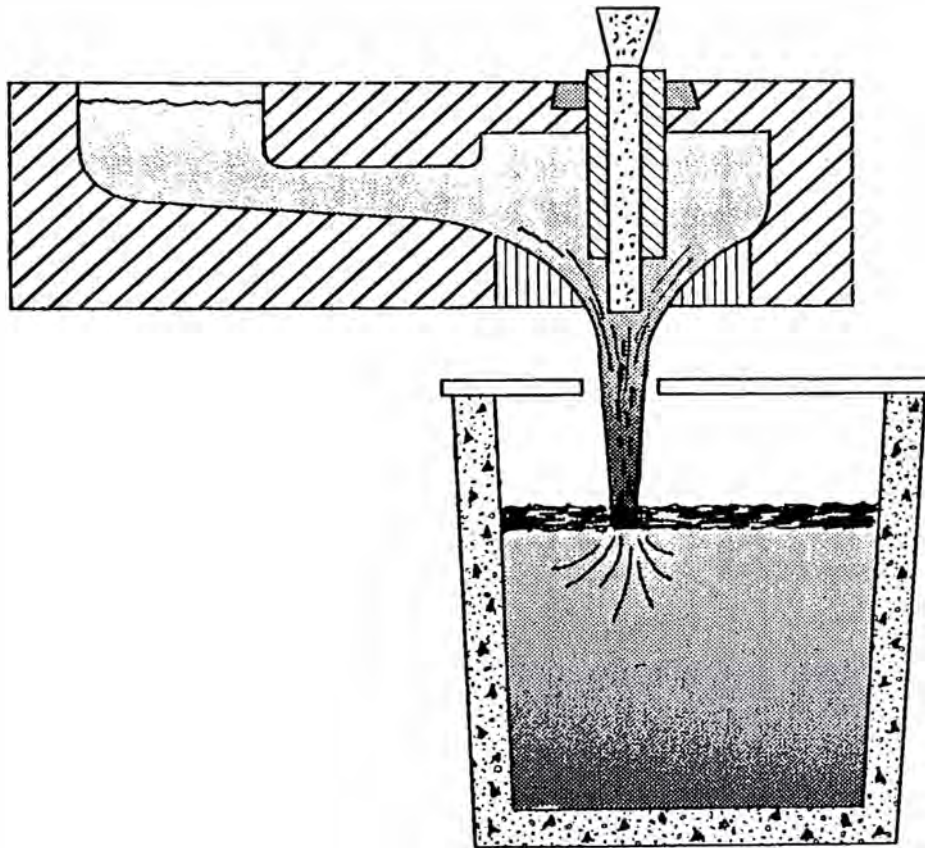


FIGURA 7.13.- Basín de vaciado del Proceso T-Nock.

La recuperación del Mg está en el rango de 75% a temperaturas de tratamiento en el rango de 1,510 °C. La reacción aleación metal es, relativamente moderada, sin embargo, deben tomarse las precauciones para la protección de los empleados y equipos. Bajo condiciones de producción, se estima que los basines de vaciado tendrán una vida de 40 a 80 tratamientos.

Recientemente, una mejora ha hecho posible usar el Proceso T-Nock sobre una base continua. Esto implica el uso de un dispositivo de alimentación continua para añadir cantidades medidas de aleaciones de Mg granular a un chorro que fluye de fierro base para la producción de fundición nodular. Cuando se usa este dispositivo de alimentación para añadir los materiales de tratamiento a una caja en remolino, como se muestra en la Figura 7.13 con un cubilote básico, es posible la producción continua de fundición nodular.

9) TRATAMIENTO EN EL FLUJO.- Este método de tratamiento es un reciente desarrollo Inglés y está patentado bajo el número de Flotret F.B., Nº 1'311,093 y U.S. Nº A-19,404-Aplicación. El proceso implica directamente un fierro base con bajo S de 0.015% o menos, que atravieza una cámara de reacción con refractarios especialmente diseñados. La unidad se construye ensamblando 4 almas de refractario.

La unidad de tratamiento consiste de un basín de vaciado, una cámara de reacción de la aleación y una cámara de expansión. Este método se ha usado para tratar cantidades de hasta 1,500 lbs. El tratamiento consiste en el vaciado de una cantidad pesada de fierro base dentro del basín de vaciado y sobre la aleación en la cámara de aleación y fuera dentro de una cuchara. La inoculación con FeSi al 75% se hace a medida que el metal fluye de la unidad de tratamiento.

La relación de entrada a salida en la cámara del proceso debe inducir un alto grado de choke si el sistema se mantiene limpio. Por ejemplo, la entrada dentro de la cámara de aleación y la salida, debe tener una relación mínima de 2:1. Una relación de 3:1 mejora la aleación FeSi magnesio a casi 75% a 80%.

El control de la solución se calcula de acuerdo a una relación pre-establecida entre la dimensión de la cámara de proceso y el flujo de metal. Esto es vital para asegurar la completa solución en 75% del flujo de metal para lavar la unidad.

El factor de solución calculado, aplicado a una aleación de FeSi con 5 %Mg en el rango de tamaño de  $1/32'' - 3/32''$ , es:

$$f = \frac{\text{Flujo (lb/seg)}}{\text{Area transversal de la cámara}} = 0.75$$

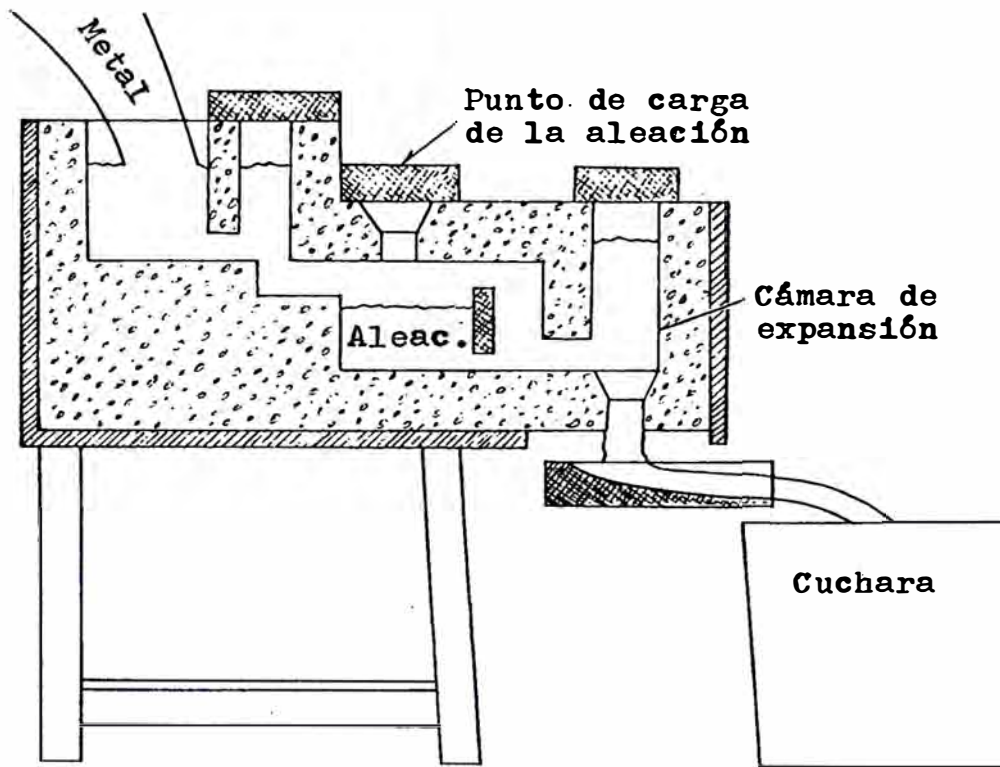


FIGURA 7.14.- Unidad de tratamiento en el flujo.

En la preparación de la unidad del flujo es necesario conocer el tiempo de procesamiento disponible y el peso del metal a procesar. Se ha encontrado que la velocidad de tratamiento no debe ser menor de 15 lbs/seg. Cuando esto ocurre la presión de vaporización del Mg produce "bolsas interiores" en la unidad de tratamiento. El cálculo del tamaño de la salida para estas unidades de tratamiento puede determinarse con la siguiente fórmula:

$$\text{AREA DE SALIDA (pulg}^2\text{)} = \frac{0.39 \text{ Peso de tratamiento (lbs)}}{\text{Tiempo}_{\text{tratamiento}} \text{ (seg)} \sqrt{\text{altura efectiva}_{\text{metal}}}}$$

El método normal de calcular los requerimientos de Mg puede usarse con un factor de recuperación de 75% o 80%. El peso por pie<sup>3</sup> de FeSi con 5 %Mg de 1/32" - 3/32", es aproximadamente 0.075 lbs.

El tratamiento "En el Flujo" se ha usado para tratar hasta 1,500 lbs. de fierro base, con buen éxito. Cucharas de hasta 20 tons. pueden tratarse sin aumentar la unidad de tratamiento. Sin embargo, si la unidad no se limpia de toda la escoria y metal, ocurrirá la prematu-

ra ignición, a medida que se introduce la aleación dentro de la cámara de tratamiento. Los requerimientos de aleación, usualmente, son de 0.7% a 0.9% de FeSi con 5 %Mg. Los problemas básicos del proceso son los siguientes:

- Destellos interiores si no se mantiene una consistente velocidad de vaciado.
- Prematura ignición o encendido de la aleación en la cámara de reacción.
- Aumento en las paredes internas de la cámara de aleación.

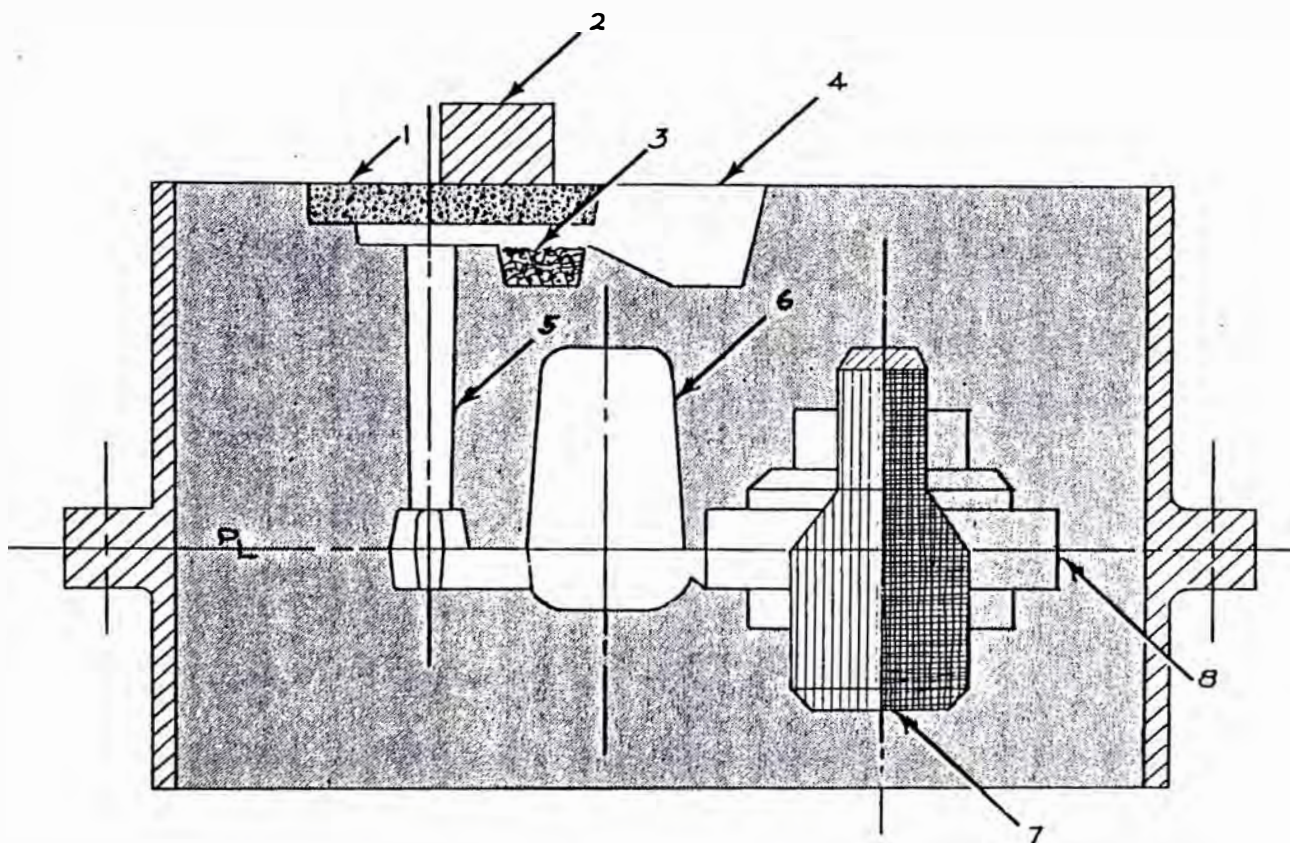
10) PROCESO INMOLD.- Uno de los más recientes desarrollos en la producción de fundición nodular, es tratar un fierro base con bajo S (0.01% máximo) en el sistema de alimentación a medida que este ingresa a la cavidad del molde. Esta técnica ha sido designada como el "Proceso Inmold". Es un proceso patentado, según U.S. Patente N° 3'703,922, todos los derechos están asignados a Materials and Methods Limited of Reigate England. En el proceso, un peso exacto de una aleación de FeSi magnesio se coloca en una cámara especialmente diseñada en el sistema de alimentación a presión. El tratamiento de nodulización ocurre en esta cámara a medida que el fierro base fluye sobre la aleación de tratamiento, como se ilustra en la Figura 7.15. Este proceso semejante a los otros métodos, se ha puesto de moda. Es muy adecuado para fundiciones de producción altamente automatizada. No es práctico para fundiciones de producción limitada, debido al considerable tiempo y costo que se requiere para desarrollar el sistema de alimentación y el diseño de la cámara de reacción.

El "Proceso Inmold" tiene un número de ventajas. Los principales beneficios son los siguientes:

- a) La eliminación de humos y gases de la reacción de tratamiento. Esto se debe a que en la reacción de tratamiento todos los productos de reacción son absorbidos por el molde de arena en verde, medio que actúa como un colector de polvo.
- b) Los niveles de recuperación del Mg están en el rango de 80% a 90%. En vista de que la reacción aleación metal fundido ocurre en un espacio limitado en el molde a una velocidad controlada, el contacto con el oxígeno es minimizado y la cantidad de óxido de Mg

producido es muy pequeña.

- c) En la mayoría de casos la necesidad de alguna forma de inoculación con FeSi, es eliminada. Esto se debe a la influencia de la aleación de tratamiento sobre la nucleación.
- d) Existe una reducción considerable en las pérdidas de la temperatura del metal comparado a los otros procesos de fundición nodular donde se realizan varias transferencias en la cuchara.
- e) Este proceso es adaptable al vaciado automático a causa de que no hay adherencia de óxidos de Mg y Al en los refractarios de la cuchara de la unidad de vaciado.



- |  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. Alma de la cubierta.                          | 5. Bebedero.          |
| 2. Peso para prevenir el levantamiento del alma. | 6. Riser.             |
| 3. Cámara de reacción de la aleación.            | 7. Alma.              |
| 4. Basín de vaciado.                             | 8. Cavidad del molde. |

FIGURA 7.15.- Molde de una pieza, con la cámara de reacción y el sistema de alimentación.

Este proceso ha sido firmemente establecido sobre una producción base en fundiciones que producen piezas para la Industria Automó -

triz. Una descripción de los fundamentos del "Proceso Inmold", se presentará a continuación.

- REQUERIMIENTOS DEL FIERRO BASE.- Se requiere un fierro base fundido, caliente, limpio, con un nivel de S por debajo de 0.01%, preferentemente en el rango de 0.005%. En la mayoría de casos, este fierro necesita desulfurarse con carburo de Ca. Sin embargo, si el nivel de S es relativamente bajo, en el rango de 0.02%, un pretratamiento con siliciuros de tierras raras neutralizará la influencia del S, ya que este se combinará con los elementos de las tierras raras para formar sulfuros estables de tierras raras que no reaccionan con el Mg. Por ejemplo: adiciones de 0.1% de aleación CSF N° 10 que contiene 10% de cerio que se combinará y neutralizará 0.01 %S. Además, este pretratamiento nuclea el fierro base e incrementa la cantidad de nódulos en la fundición nodular producida por el Proceso Inmold. Otro factor a considerarse es el alto contenido de Si del fierro base usado en este proceso. El contenido de Si del fierro base estará por encima del 2.0%, en vista de que sólo 1.0% o menos de aleación de tratamiento, es usado normalmente. A continuación, se presentará un ejemplo de un fierro base a emplearse con el Proceso Inmold.

Elemento	Contenido, %
Si	1.50 - 2.25
C	3.60 - 3.80
P	0.02 Máx.
S	0.01 Máx.
Mn	0.15 grado ferrítico 0.40 grado perlítico
Cr	0.02 Máx.
Cu	0.05 Máx.
V	0.02 Máx.

Es muy importante que se mantengan los bajos niveles de los elementos estabilizadores de carburos y fósforo, en los fierros nodulares producidos por el Proceso Inmold. Si esto no se hace, se producirán carburos celulares.

- SISTEMA DE ALIMENTACION.- Normalmente, los sistemas de alimentación usados en el Proceso Inmold consisten de una entrada y salida simple a y desde la cámara de reacción sobre un plano horizontal, como se muestra en la Figura 7.15. La cámara de reacción puede colocarse en la tapa o completamente en la base. A me

nudo, se usa una entrada traslapada para alimentar metal dentro de la cámara de reacción localizada en la base. La entrada y salida a la cámara de reacción debe ser tan amplia como la cámara de reacción. Se recomienda un sistema de alimentación totalmente a presión. El sistema se basa en las siguientes relaciones:

A = Area de choke o área de entrada a la pieza, en pulg<sup>2</sup>.

Area B (canal de colada) = A + 0.10 A

Area C (salida de la cámara) = A + 0.12 A

Area D (entrada a la cámara) = A + 0.30 A

Area E (bebedero) = A + 0.30 A

- DISEÑO Y TAMAÑO DE LA CAMARA DE REACCION.- El diseño de la cámara de reacción está basado sobre la velocidad de vaciado en lbs/seg y el área superficial de la cámara en pulgadas cuadradas. El tamaño de la aleación y la temperatura de vaciado, deben permanecer constantes en este proceso. Las etapas involucradas en el diseño de la cámara de reacción, son las siguientes:

- 1.- Determinar el peso total de vaciado al molde. Este incluye la pieza o piezas, sistema de alimentación y risers. En general, la eficiencia de la fundición por el Proceso Inmold está en el rango de 40.0%, en piezas de hasta 100 lbs.
- 2.- Determinar el tiempo de vaciado en segundos. Ver la Tabla 9.1.
- 3.- Calcular la velocidad de vaciado en lbs/seg.

$$\text{Velocidad de vaciado, lbs/seg} = \frac{\text{Peso de vaciado al molde, en lbs}}{\text{Tiempo de vaciado, en seg}}$$

- 4.- Calcular el área de la cámara de reacción en pulg<sup>2</sup>, usando la ecuación del factor de solución.

$$\text{Factor de solución} = \frac{\text{Velocidad de vaciado (lbs/seg)}}{\text{Area de la cámara (pulg}^2\text{)}}$$

El factor de solución es una constante y, usualmente, es igual a: 0.65 - 0.75

$$\text{Area de la cámara de reacción (pulg}^2\text{)} = \frac{\text{Velocidad de vaciado (lbs/seg)}}{0.7}$$

- 5.- Calcular la cantidad requerida de aleación de Mg. Usar 1% de Noduloy 5-LC o 5-R1.



Peso de aleación de Mg = Peso de vaciado x 0.01

6.- Calcular el volumen de aleación de Mg. La densidad de las aleaciones de FeSi magnesio de 5 a 18 mallas es 0.07319 lbs/pies<sup>3</sup> o 1.95278 gr/cm<sup>3</sup>.

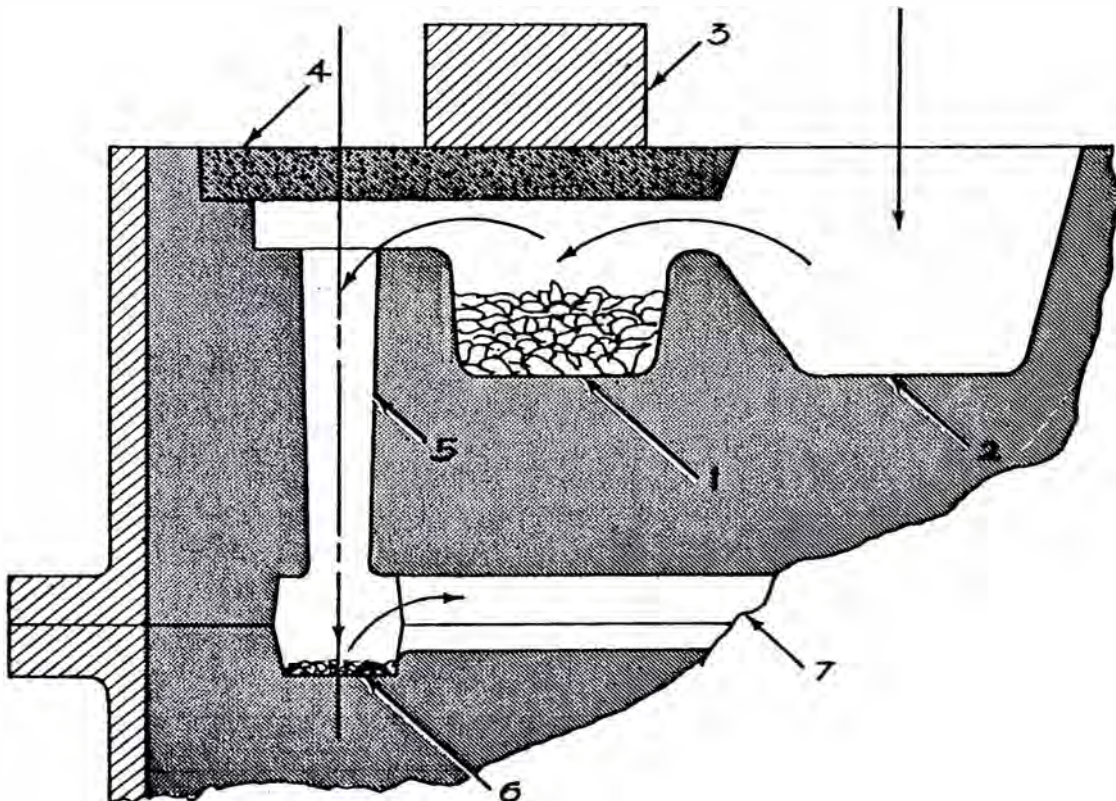
Volumen = 0.07319 x Peso de aleación

7.- Calcular la profundidad de la cámara de reacción y añadir al espacio de entrada y reacción 1.5".

Profundidad =  $\frac{\text{Volumen de aleación (6.)}}{\text{Area de la cámara de reacción (4.)}} + 1.5''$

8.- Calcular el volumen de la cámara de reacción.

Volumen de la cámara de reacción =  $\frac{\text{Area de la cámara de reacción}}{\text{de reacción}} \times \text{Profundidad de la cámara}$



- |  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. Aleación de tratamiento en el basín | 5. Bebedero                   |
| 2. Basín de vaciado.                   | 6. FeSi de 75%, de malla -40. |
| 3. Peso.                               | 7. Canal de colada.           |
| 4. Alma de la cubierta.                |                               |

FIGURA 7.16.- Proceso Inmold para la producción de fundición nodular.

En vista de que la Figura 7.16 muestra a la cámara de reacción como una extensión del basín de vaciado, la reacción puede incorporarse con el sistema de alimentación en la línea de partición.

En algunos casos la cámara de reacción consiste de un alma ensamblada. Se ha reportado que cuando se vacían piezas de 1 ton. o más, pueden usarse 2 o más cámaras de reacción en un molde, la construcción de estas 2 secciones del sistema de alimentación deben ser idénticos.

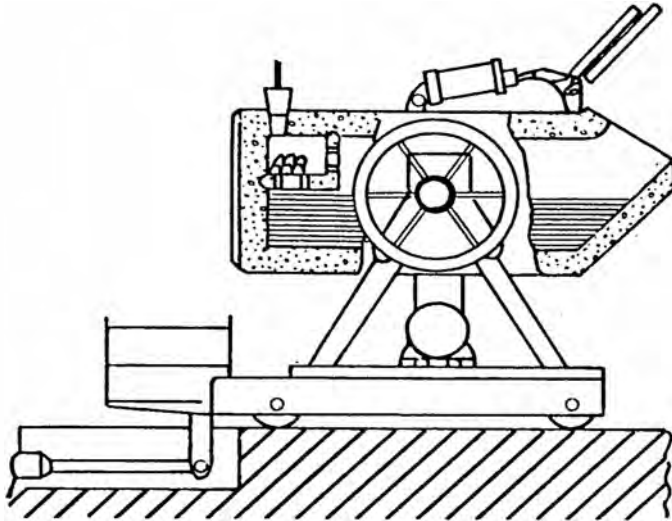
Las propiedades mecánicas de las piezas producidas por el Proceso Inmold son comparables a aquellas producidas por otros procesos. Sin embargo, debe entenderse que cada pieza es una colada o tratamiento separado y a fin de verificar su nodularidad, cada pieza requiere alguna forma de ensayo. Probablemente, el método más satisfactorio sea el ensayo de ultrasonido.

11) PROCESO DEL CONVERTIDOR FISHER.- Es un nuevo método de producir fundición nodular, desarrollado por George Fisher Limited, Schaffhausen, Suiza. Se han construido convertidores con capacidades de hasta 8,000 lbs. y están en uso en la Fundición Fisher en Mettman, Alemania. Actualmente, otras 6 fundiciones en Europa están usando este proceso.

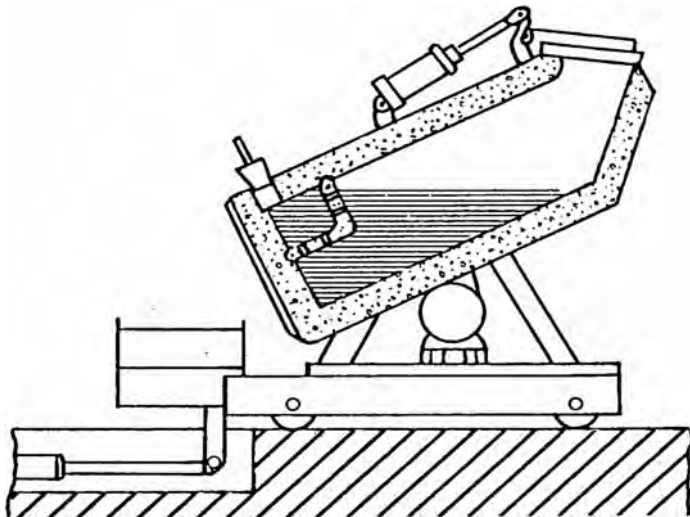
Esta técnica de tratamiento implica el uso de Mg metálico y no FeSi magnesio o aleaciones Ni-Mg. Usando este método es posible emplear todos los retornos de fundición de alto Si en el horno de fundición, sin la dificultad de aumentar el contenido de Si de la fundición nodular más allá de los límites razonables, que ocurre cuando se usan aleaciones de Si-Mg.

El convertidor Fisher es un "vaso" que es muy similar en configuración y en operación, a un convertidor Bessemer. Este es un vaso revestido con refractario montado sobre un trunnion, tal como se muestra en la Figura 7.17. Se localiza en el fondo del vaso, una cámara de reacción perforada con refractario, para contener los lingotes de Mg. Una descripción del procedimiento del tratamiento, es como sigue:

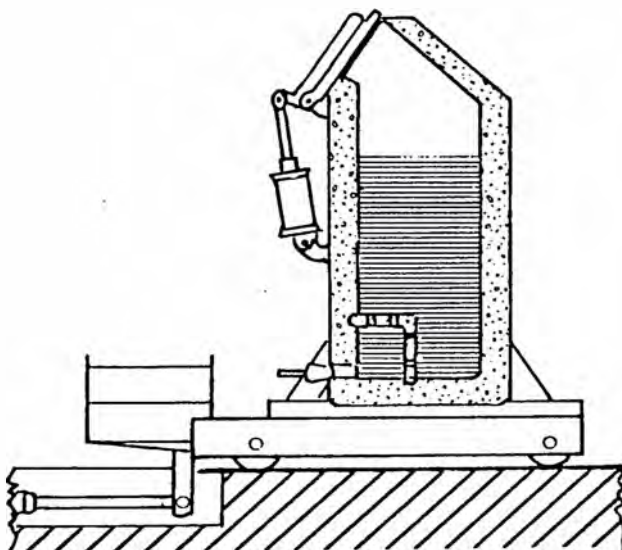
- 1.- El convertidor se llena con fierro base mientras está en una posición horizontal. Observar que la cámara de reacción se localiza por encima del fierro base fundido y no entra en contacto con el metal mientras este en una posición horizontal.



POSICION DE LLENADO



POSICION INCLINADA



POSICION DE TRATAMIENTO

FIGURA 7.17.- Convertidor Fisher.

- 2.- Mientras el vaso está en una posición horizontal y después del llenado, la cámara de reacción se carga con una adecuada cantidad de lingotes de Mg puro. El tapón de cierre es asegurado en su lugar y la abertura de cargado del metal se cierra con un cilindro de aire.
- 3.- El tratamiento ocurre cuando el vaso se gira a una posición vertical. El fierro base fundido rodea la cámara de reacción e ingresa a esta a través de los agujeros, produciendo la vaporización del Mg. El hecho de que la tapa de la puerta de cargado del metal este sellada, produce un aumento de la presión en el convertidor de 4 a 5 lbs./pulg<sup>2</sup>. El tiempo de tratamiento para convertidores de 1 ton. de capacidad es de 60 a 70 segundos.
- 4.- Después que se completa la reacción, la tapa es retirada de la abertura de carga del metal y el convertidor se gira a la posición de vaciado. El fierro tratado es vaciado del vaso al interior de las cucharas e inoculado con FeSi.

Las recuperaciones del Mg con este proceso están en el rango de 50% a 65%. La mayoría de las fundiciones Europeas usan estos convertidores para desulfurizar y nodulizar fierros base fundidos en cubilo - tes ácidos.

La reacción de tratamiento en el vaso es muy violenta. Por lo tanto, debe tenerse un extremo cuidado y tomarse todas las precauciones en el mantenimiento de la operación de este convertidor, si se desea evitar serios accidentes.

El factor limitante en la operación de un convertidor Fisher, es la vida del refractario de la cámara de reacción perforada. Las fundiciones Europeas han reportado 150 o más tratamientos antes que se requieran principales reparaciones. Sin embargo, los resultados en los E.E.U.U. han sido considerablemente más bajos.

Las ventajas del convertidor Fisher, son las siguientes:

- 1.- Pueden tratarse satisfactoriamente fierros base de cubilotes ácidos.
- 2.- La fundición nodular producida en el convertidor, es limpia y contiene menos escoria y MgO.

3.- No hay limitación sobre la cantidad de retornos de fundición que pueden usarse en las cargas del fierro base.

4.- Estrecho control de la composición de la fundición nodular y, relativamente, bajas pérdidas de C.

12) EQUIPO DE TRATAMIENTO ESPECIAL CON MAGNESIO COQUE.- Las recuperaciones de Mg de coques impregnados con Mg, cuando se usan en el proceso con émbolo, han sido siempre relativamente bajos. Se consideran normales recuperaciones de 18% a 20%. Dos recientes mejoras que se han reportado incrementaron las recuperaciones del Mg hasta 30%, estos 2 tratamientos se describirán a continuación.

- LA CUCHARA CON FONDO DESMONTABLE.- Este dispositivo consiste de una cuchara revestida con refractario y una sección de fondo separado. Se localiza en la parte inferior de la cuchara, un disco perforado de refractario de alta alúmina, como se muestra en la Figura 7.18. La sección inferior de la cuchara se usa para contener el "magnesio coque". En la preparación para el tratamiento, el fondo llenado con magnesio coque se conecta a la sección superior. Arena de moldeo apisonada proporciona un sello entre el fondo y la sección superior de la cuchara. La operación de tratamiento consiste del llenado de la cuchara tan rápidamente como sea posible con una apropiada cantidad de fierro base fundido. Esta técnica ha demostrado ser muy satisfactoria en la producción de grandes cantidades de fundición nodular para la fabricación de tuberías.

- LA CUCHARA CON ANAQUEL PERFORADO.- Esta cuchara de tratamiento consiste de una cuchara cilíndrica vertical con el extremo superior abierto. La relación entre el diámetro y la altura es alrededor de 3:1. Un anaquel perforado se localiza en el 20% inferior de la cuchara. El anaquel se eleva formando un ángulo de 5° con la horizontal. Un agujero con casi 15% del área de la cuchara se ubica en la sección inferior del anaquel, tal como se ilustra en la Figura 7.19.

La operación de este equipo es relativamente simple. La descripción del tratamiento usando la cuchara con anaquel, es como sigue:

1.- La cantidad requerida de magnesio coque se alimenta a través

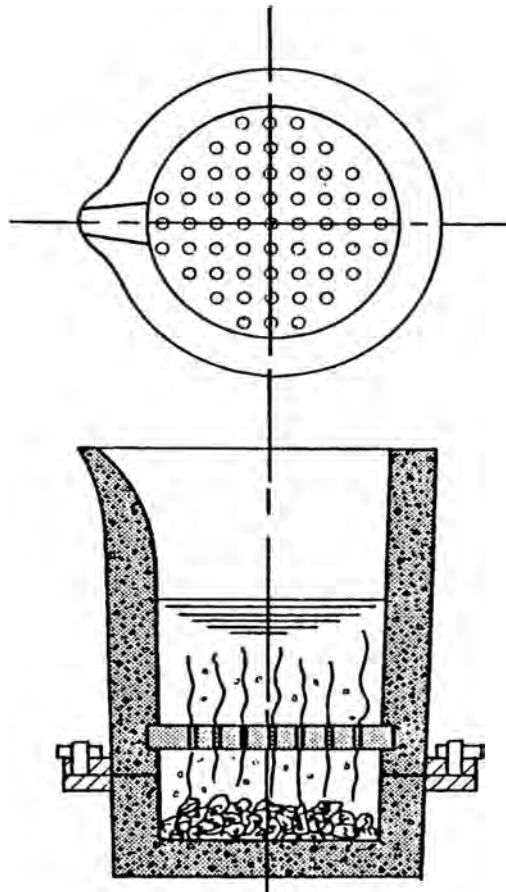


FIGURA 7.18.- Cuchara de fondo desechable para la producción de fundición nodular.

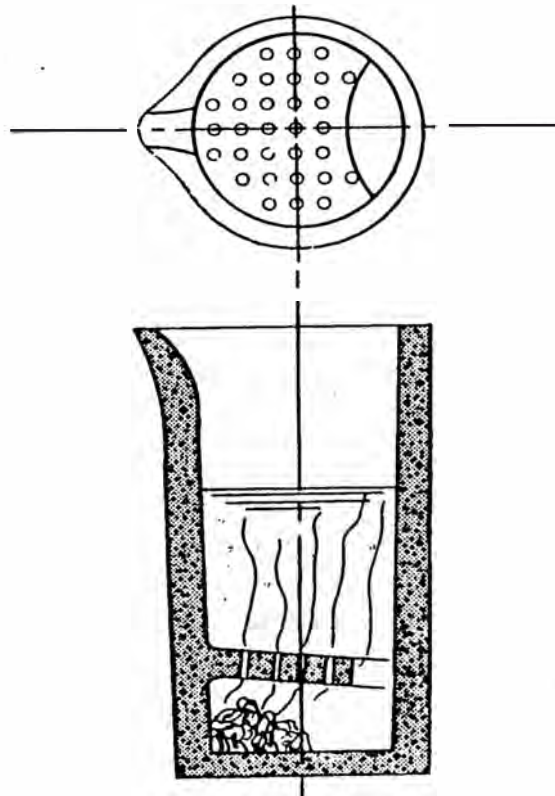


FIGURA 7.19.- Dibujo esquemático de una cuchara con anaquel para la producción de fundición nodular.

del agujero en el anaquel y se introduce bajo el anaquel por la inclinación de la cuchara.

- 2.- La cuchara luego se llena tan rápidamente como sea posible y se deja la reacción de tratamiento hasta que se complete.
- 3.- Se vacía el metal tratado de la cuchara y se inocula.
- 4.- Cuando todo el metal está fuera de la cuchara, esta se gira al revés y se descarga fuera el coque consumido.

Este tipo de cuchara hace posible la eficiente utilización del magnesio coque, para el tratamiento de cantidades relativamente pequeñas de fierro base.

13) PROCESO PONT-A-MOUSSON O M.A.P.- El Proceso M.A.P. es una variación del proceso con émbolo que implica el uso de lingotes o tochos revestidos con refractario. Este proceso es usado por la Glamorgan Pipe Division of Amsted, para producir todos los tamaños de tuberías torneadas de fundición nodular.

Se usan lingotes de Mg puro como el material de tratamiento en este proceso. Uñas de concreto endurecido son empujadas dentro de las esquinas de bloques de Mg pre-pesados. Luego se conecta una doble brazadera. Los bloques de Mg son luego revestidos con 3 capas individuales de refractario en suspensión secados al aire. Los bloques de Mg se revisten por inmersión de tal forma que tenga casi 1/2" a 3/4" de la esquina más cercana a la uña expuesta sin ningún revestimiento refractario. El segundo revestimiento refractario es bañado con 3/4" por debajo de la primera capa y la tercera capa está 3/4" por debajo de la segunda capa.

Cuando se bañan o impregnan los lingotes, estos deben estar limpios y libres de grasas o aceites. El revestimiento refractario no debe pelarse o rajarse en las superficies planas o esquinas o la velocidad de reacción entre el fierro fundido y el Mg se acelerará y puede producirse una explosión.

El tamaño de tratamiento usado en la producción de tuberías, usualmente, es 5 tons. de fierro base desulfurizado con niveles de Si de 2.35%. Cucharas y tapas de cucharas usadas en el proceso, se fabrican con planchas de acero de 5/8" a 3/4" y reforzadas con nervios verticales y circulares para resistir la presión externa del vapor de Mg en

caso de una explosión. El equipo de tratamiento consiste de un carro para la cuchara y una tapa con una campana de émbolo conectada, que actúa y se mantiene en su lugar con un martinete hidráulico durante el tratamiento. Una descripción del procedimiento de tratamiento, es el siguiente:

- 1.- Un bloque de Mg revestido con refractario se coloca en la campana de tratamiento y roscado a través de la abrazadera con una barra de acero de 1/4" mantenido en su lugar por los agujeros al lado del émbolo de la campana.
- 2.- La cuchara y el carro son luego colocados bajo el émbolo de la campana.
- 3.- La temperatura de tratamiento para tuberías es 1,455 °C.
- 4.- El Mg es sumergido dentro del fierro base fundido y la tapa se asegura en su sitio con un martinete hidráulico. El tiempo de reacción es de 45 a 50 segundos. El destello de la presión al levantar la tapa de la cuchara, es considerable.

La recuperación del Mg a 1,455 °C es de aproximadamente 50% a 60%, a temperaturas en el rango de 1,510 °C las recuperaciones de Mg obtenibles son de 35% a 40%.

El proceso M.A.P. se ha usado satisfactoriamente en la producción de tuberías de fundición nodular por un número de años. El punto débil del proceso es la aún presente posibilidad de una reacción de tratamiento explosiva, debido a un inadecuado revestimiento de la plancha de Mg.



**C A P I T U L O    V I I I   . -   I N O C U L A C I O N   E N   L A   P R O D U C C I O N   D E  
L A   F U N D I C I O N   N O D U L A R**

La inoculación es un paso necesario en la producción de fundición nodular. Los fierros tratados con Mg sin inoculación son casi completamente carbúricos (blanca) y el grafito que puede haberse formado de la nucleación residual es compactado, pero no necesariamente esferoidal. La etapa de inoculación, por lo tanto, es un paso importante en la producción del fierro con grafito esferoidal y debe realizarse con el mismo cuidado y precisión como el tratamiento con Mg. Las Figuras 8.1, 8.2 y 8.3, presentan las típicas microestructuras de fierros fundidos tratados con Mg no inoculado, bajo inoculado e inoculado.

En el caso de la fundición nodular, la inoculación es un medio de promover la cristalización o la formación de esferoides de grafito, la supresión de la formación de carburos y para incrementar la cantidad de células eutécticas.

Una teoría del mecanismo de inoculación es que pequeñas partículas de grafito se precipitan en el metal, por la adición de un potente grafitizador tal como el FeSi. Esta teoría sostiene que el trozo de FeSi que se está disolviendo al instante, aumenta el contenido de Si del metal inmediatamente contiguo a un nivel tal que esta zona es super saturada con respecto al C y estas partículas de nucleación de grafito son precipitadas. Sobre la base de esta teoría es fácilmente comprensible que una partícula muy pequeña de Si no producirá suficiente concentración local de Si, antes que este se disipe. En otras palabras, hay un tamaño crítico para el FeSi que producirá una óptima efectividad. De esto, también se desprende que la temperatura del FeSi al mismo tiempo que su adición al fierro fundido, tienen un importante efecto sobre su habilidad para suministrar concentración local de Si. La temperatura mínima para una máxima eficiencia de inoculación es 1,480 °C.

Además del FeSi existe un número de otros elementos y compuestos que actúan como inoculantes y promueven la formación de grafito esferoidal. Algunos de estos materiales son: calcio, aluminio, bario, estroncio y nitruros de boro. Los carburos de estos elementos y los nitruros de boro, tienen estructuras cristalinas similares al grafito y, por lo tanto, se consideran que proveen buenas condiciones. De este modo, ellos pueden actuar como semillas o centros para la formación de cristales o esferoides de grafito en este caso.



FIGURA 8.1.- Fundición nodular no inoculada, atacada con Nital al 2%, a 250 X.

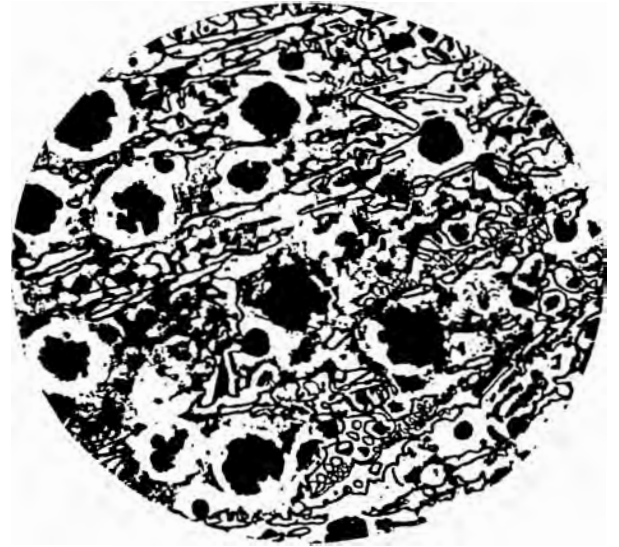


FIGURA 8.2.- Fundición nodular bajo inoculada, atacada con Nital al 2%, a 100 X.

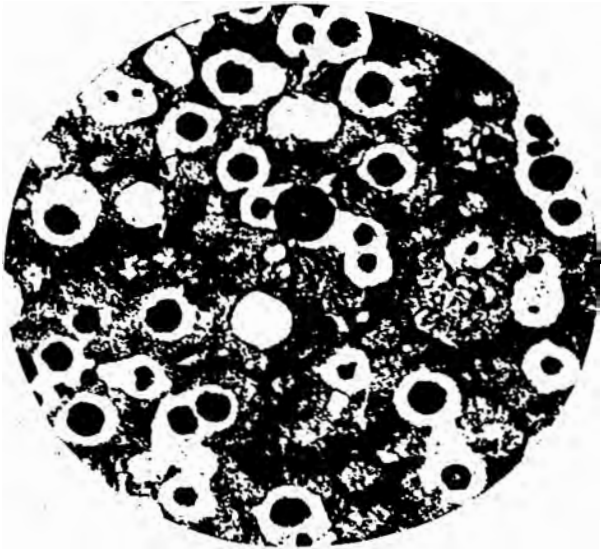


FIGURA 8.3.- Fundición nodular adecuadamente inoculada, atacada con Nital al 2%, a 250 X.

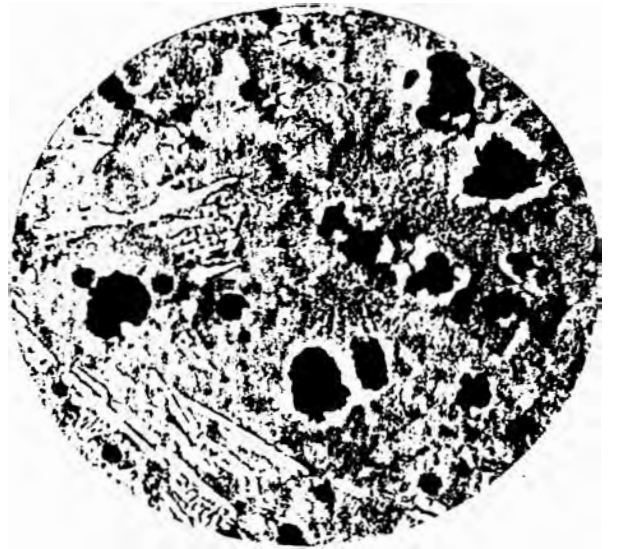


FIGURA 8.4.- Débil inoculación. No notar los carburos y la forma irregular de los nódulos, atacada con Nital al 2%, a 250 X.

## 8.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FORMACION DE CARBUROS

La cantidad de carburos masivos formados en las piezas de secciones livianas de fundición nodular, se reduce por:

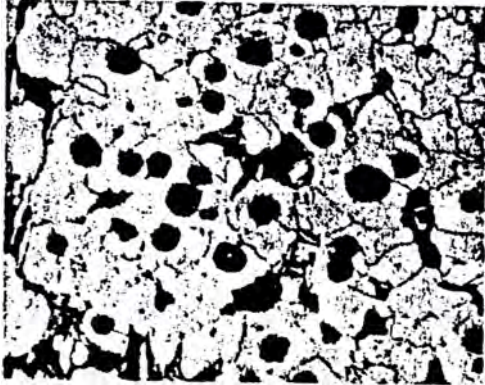
- a) Altas temperaturas de vaciado en el rango de 1,316 °C a 1,482 °C.
- b) Un S en el fierro base en exceso de 0.02%.
- c) La presencia de una pequeña cantidad de cerio (0.0025% a 0.01%).
- d) Un efectivo pero no excesivo tratamiento con el contenido de Mg que cae en el rango de 0.03% a 0.045%, dependiendo del contenido de S en el fierro base.
- e) Un alto carbono equivalente en el fierro base de 4.7% a 4.8%.
- f) Una inoculación relativamente larga con 0.70 a 1.00 %Si.

Los bajos niveles de carburos masivos en piezas de secciones delgadas (1/4" o menos), generalmente, son acompañados por altas cantidades de nódulos y células.

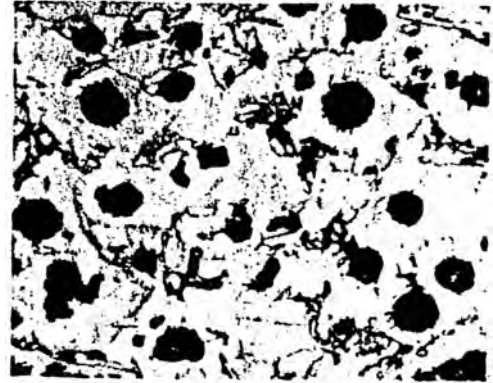
La inoculación con 20 lbs. de FeSi de 75% con Ca por ton., es considerablemente más efectiva que 7 lbs/ton, para reducir los carburos. La inoculación en el molde con FeSi de 75% es una forma muy efectiva para minimizar la formación de carburos masivos en las piezas de fundición nodular. La efectividad de inoculantes adicionados al chorro de metal, variará considerablemente. La propensión de reducir el chill por los inoculantes, es apreciablemente influenciada por el tiempo de adición. Cuando los inoculantes se adicionan al instante después del tratamiento, el efecto tiende a perderse si el metal se conserva por largos períodos de tiempo antes del vaciado. Las Figuras 8.4 y 8.5, son representativas de estos factores.

## 8.2. TIPOS DE INOCULANTES

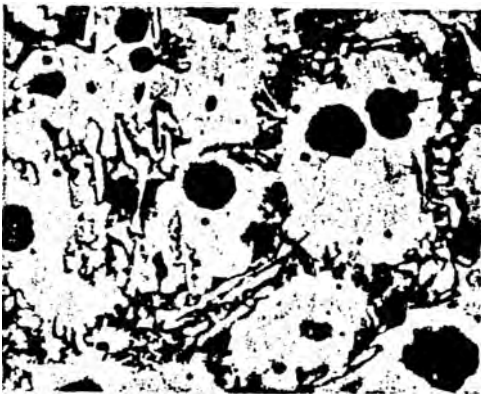
El FeSi de 75% es el inoculante más ampliamente empleado. Se prefiere el grado con Ca debido a su gran capacidad de reducir el chill. El tamaño óptimo de las partículas es de 3/8" a malla 12. Además del tamaño grueso de las partículas, existen otros requerimientos mecánicos relacionados con la adición de Si, que deben seguirse a fin de proporcionar una efectiva inoculación. El incremento en el contenido de Si del metal, determinado por análisis químico, no es un índice confiable de que se ha alcanzado una efectiva inoculación. Particularmente en secciones



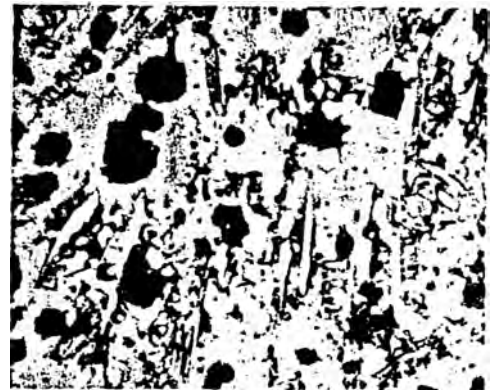
2% Carburos



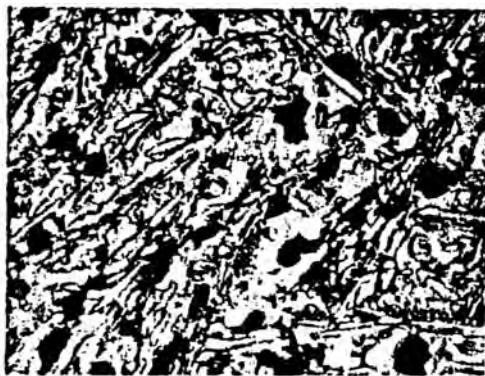
5% Carburos



10% Carburos



20% Carburos



50% Carburos

FIGURA 8.5.- Microestructuras conteniendo diversas cantidades de carburos, atacadas con Nital al 2%, a 100 X.

ciones livianas, esto es completamente posible al añadir Si al fierro y todavía no vencer totalmente el efecto de chill del Mg.

Los inoculantes conteniendo Al y Ca son más efectivos que aquellos que no contienen ambos elementos o que contienen un solo elemento. Sin embargo, el Al aumenta la afinidad por la ganancia de hidrógeno y de este modo las porosidades o pinholes, por lo tanto, el contenido de Al debe mantenerse bajo. El FeSi más popular es aquel que contiene 1.50% máximo de Ca y 1.50% máximo de Al. El contenido promedio de Ca es 1.00% y el contenido promedio de Al es 1.00%.

Además del FeSi, existen otros inoculantes patentados que se encuentran disponibles. Uno de estos es Inoculoy, producido por el Foote Mineral Company. La composición típica de este material es la siguiente:

60-65 %Si; 1.50-3.00 %Ca; 1.00-1.50 %Al; 4-6 %Ba; 9-12 %Mn; y el resto %Fe

Muchos productores de fundición nodular, tienen problemas al utilizar todos los retornos de su fundición y mantienen el Si por debajo de los niveles máximos especificados. Ellos, por lo tanto, deben reducir la cantidad de inoculante usado, resultando una fundición nodular de inferior calidad conteniendo excesivas cantidades de carburos, en piezas de secciones delgadas en la condición de bruto de colada. Esto origina la necesidad de un costoso tratamiento térmico y un mayor tiempo.

Este problema puede superarse en algunos casos, usando Inoculoy. Puede obtenerse una efectiva inoculación en secciones de 3/8" con un carbono equivalente de 4.60, con la adición de 0.13% a 0.20%. Para un resultado similar se usa una adición de 12 a 14 lbs. de FeSi de 75% por ton. o una adición de Si de casi 0.50%. El uso de grandes cantidades de FeSi puede aumentar el contenido de Al de la fundición nodular. Esto tiende a incrementar la incidencia de pinholes en las piezas.

**METODO Y CANTIDAD PREFERIDA.**- El mejor método de inoculación del fierro conteniendo Mg, consiste de la adición de Si progresivamente al chorro durante el recuchareo para que, hasta donde sea posible, cada partícula de Si este abastecida con una porción fresca del fierro para el tratamiento. Una forma menos deseable consiste en la colocación del Si en el fondo de la cuchara dentro de la

cual el fierro conteniendo Mg es recuchareado. En este caso, la temperatura del FeSi puede elevarse al punto donde este pierde una parte considerable de su habilidad inoculante.

Esto ha sido demostrado claramente por el hecho que el FeSi fundido no tiene efecto de inoculación. Otros métodos indeseables de inoculación son estos:

- a) Añadir los inoculantes con el material de tratamiento.
- b) Añadir inoculantes a la superficie de la cuchara e intentando agitarlos dentro del metal. Esto puede producir la inoculación de la parte superior del fierro en la cuchara.

Debe ponerse un énfasis considerable sobre la mecánica de conducción del procedimiento de inoculación, en vista de que existen muchos ejemplos disponibles que muestran su importancia. En un caso, una pieza de sección delgada fundida con arena en verde fue altamente carbúrica donde el inoculante se añadió en el fondo de la cuchara de vaciado. Sin embargo, añadiendo el inoculante al chorro durante el recuchareo con ningún cambio en el tamaño de la adición, se produjeron piezas libres de carburos.

La cantidad de inoculación requerida depende de la composición del fierro, el espesor y la velocidad de solidificación de la pieza, el tipo de horno de fusión y la composición del inoculante usado. En piezas de secciones livianas, se usan gruesas adiciones de FeSi hasta de 1.00%, para minimizar la formación de carburos. En el caso de piezas con secciones mayores de 2" de espesor, donde la flotación del C puede ser un problema y el carbono equivalente debe mantenerse por debajo de 4.30, las adiciones de Si en la forma de FeSi puede conservarse entre 0.25% a 0.30% o puede usarse el Inoculoy.

### 8.3. TECNICAS ESPECIALES DE INOCULACION

1) SISTEMA DE CUCHARA SIMPLE.- Cuando las circunstancias son tales que es imposible el doble recuchareo, la adición de Mg tanto como la inoculación pueden hacerse en una simple cuchara. El procedimiento usual para realizarlo es adicionar 1/2 del inoculante con la aleación de tratamiento al fondo de la cuchara. El resto del inoculante debe añadirse cuando se ha vaciado los 2/3 del fierro ba

se dentro de la cuchara de tratamiento para que este pueda mezclarse a fondo con el fierro. Debe hacerse todo el esfuerzo posible para proporcionar una gran agitación cuando se realiza la adición final del inoculante.

Otra forma para inocular en una simple cuchara de tratamiento, es la adición de carburo de Si de alta pureza con el material de tratamiento. Esto siembra el metal tratado con muchos núcleos duraderos que inoculan el fierro y persisten por un largo período de tiempo. Deben usarse adiciones de aproximadamente 0.5 %Si en la forma de carburo de Si del grado abrasivo de alta pureza de malla -8.

Este mismo procedimiento puede realizarse durante el sangrado de un horno eléctrico y de este modo se puede producir fierro con grafito esferoidal, sin el recuchareo. Sin embargo, debe entenderse que la calidad de tal fierro no es totalmente tan buena como el producido por el recuchareo o el tratamiento de 2 etapas. Además, usualmente, están presentes mayor cantidad de nódulos malformados y algunos grafitos vermiculares. Esto es, particularmente cierto en piezas de secciones gruesas. Mayor tendencia a formar carburos, es evidente en piezas de secciones delgadas. Estos problemas pueden superarse por una práctica de inoculación en el molde, que implica la introducción de 0.05% a 0.10% de finos de FeSi dentro del canal de colada o sistema de alimentación. Esta práctica ha demostrado ser muy efectiva en grandes piezas que pesan hasta 50,000 lbs.

2) REINOCULACION.- El total efecto de inoculación puede ser restaurado por la adición de una pequeña cantidad de FeSi. Por ejemplo, si una cuchara inoculada con 0.75 %Si se ha mantenido por 15 minutos debido a una paralización de la grúa, esta puede restaurarse a una condición totalmente inoculada por la adición de una pequeña cantidad de Si, esto es 0.15%. Para piezas livianas que requieren estructuras en bruto de colada cuidadosamente controladas, esta es a veces la práctica para reinocular la cuchara con pequeñas adiciones de Si a intervalos periódicos.

La anterior descripción puede ocasionar preguntas como la posibilidad de producir piezas de secciones gruesas que requieren varias horas para solidificar. Sin embargo, tales piezas no presentan proble -



mas. La piel solidificada, de este modo previene las pérdidas de Mg por oxidación por un lado y por otro lado las secciones tan gruesas que requieren una pequeña, si alguna, inoculación. En efecto, bloques de yunques y rodillos de varios pies de espesor se han producido sin una post inoculación y han tenido estructuras satisfactorias de grafito esferoidal.

3) DOBLE INOCULACION.- Se ha encontrado que una pequeña adición de FeSi (0.20% a 0.30%) durante la transferencia del hierro a la cuchara de vaciado, es beneficiosa en la eliminación de carburos en piezas de secciones delgadas y en el chill inverso en secciones medias. Por lo tanto, en vez de añadir el total de inoculante al cubilote, se recomienda que el procedimiento de inoculación se descomponga y parte de este se complete justo antes del vaciado. Este tipo de tratamiento es, especialmente, ventajoso cuando hay un largo lapso de tiempo entre la inoculación y el vaciado.

4) INOCULACION EN EL MOLDE.- La inoculación en el molde fue originalmente desarrollada como un medio de eliminar los carburos en la línea central y la formación de carburos en secciones menores de 1/4" de espesor. Es una forma secundaria de inoculación que principalmente supera la pérdida y lo inadecuado en las prácticas de inoculación.

Es un procedimiento, relativamente simple. Un gramo de FeSi de 75% conteniendo alrededor de 1.00 %Al y 1.00 %Ca, se coloca en el molde en la base del bebedero y el molde se vacía en la forma usual. El FeSi se tamiza a malla -30 (a través de un tamiz standard U.S. Nº 30 o abertura de 0.232"). El material grueso no se disuelve completamente y el material de malla -100 se oxida en contacto con el hierro, produciendo una grafitización mediocre. El moldeador añade el FeSi a cada molde antes de cerrarlo, por medio de una cuchara que contenga 1 gramo. Se trabaja con dosis de 2 gramos, en piezas que pesan tanto como 150 lbs. Pueden también añadirse FeSi granular e inoculantes, al bebedero en la forma de tabletas aglomeradas con parafina. Estas tabletas vienen en tamaños que contienen 1, 2 y 3 gramos de FeSi granular. Además, puede añadirse FeSi de 75% en la forma de bolas o pelets aglomerados con un aglomerante de silicato de Na.

Además, para compensar la tendencia a perder el efecto de inoculación, parece ser que una extremadamente pequeña adición al molde nuclea el grafito, formando más y pequeños nódulos y más ferrita. Este tratamiento elimina el costoso tratamiento térmico y requiere mucho tiempo para grafitizar los indeseables carburos duros en la línea central.

Otra forma de inoculación en el molde implica el uso de pequeñas piezas rectangulares de FeSi de 75% moldeadas dentro de los canales de colada o basines de vaciado. La aleación que se inserta es, usualmente, de 1" x 1" o 1/2" x 1" y aproximadamente 1/2" de espesor. Estas piezas de FeSi pueden también ser aglomeradas a un colador cerámico con un cemento refractario. Esta práctica elimina alguna posibilidad de que partículas granulares de inoculante lleguen a embeberse en las piezas fundidas.

#### 8.4. PERDIDA DE LA INOCULACION.

En el caso de la fundición nodular, la inoculación desaparece o se pierde de la misma manera como en la fundición gris. El período de tiempo efectivo es, usualmente, de 10 a 15 minutos en el caso de una inoculación con FeSi. Cuando se usa el Inoculoy, el tiempo efectivo es más largo.

Si las piezas son livianas, esto es, 1/2" o menos de espesor, entonces la influencia de la pérdida de la inoculación se sentirá prontamente. Un fierro de bajo poder de grafitización conteniendo 3.4 %C, 1.8 %Si, será más susceptible a un tiempo de conservación que un fierro de alto poder de grafitización conteniendo 3.8 %C y 2.50 %Si. La inoculación desaparecerá más rápido en fierros a una alta temperatura que en fierros a una baja temperatura. Donde se producen piezas con arena en verde que requerirá un estrecho control estructural en la condición de bruto de colada, deben hacerse ensayos de la cuña (chill) a intervalos regulares hasta hacer evidente que la fundición nodular permanece efectivamente inoculada hacia el final del vaciado.

**C A P I T U L O    I X   .- PROPIEDADES DE FUNDICION**

Cuando se produce un fierro tratado con Mg de aceptable calidad y adecuada temperatura de vaciado, el equipo de aparejos y moldeo determinan largamente el costo de la pieza de fundición nodular. Por esta razón, la característica de la fundición nodular relacionada a la práctica de fundición, es muy importante. Si se obtienen bajos niveles de chatarra y alto rendimiento de fundición, el fundidor debe tomar ventaja de todo el conocimiento disponible y aplicarlo a su área de actividad.

### 9.1. CONTRACCION DE LA FUNDICION NODULAR

Durante el enfriamiento y la solidificación, la fundición nodular sufre un decremento en el volumen, una expansión cuando ocurre la formación del grafito y luego una adicional contracción térmica o contracción. Una descripción gráfica se presenta en la Figura 9.1.

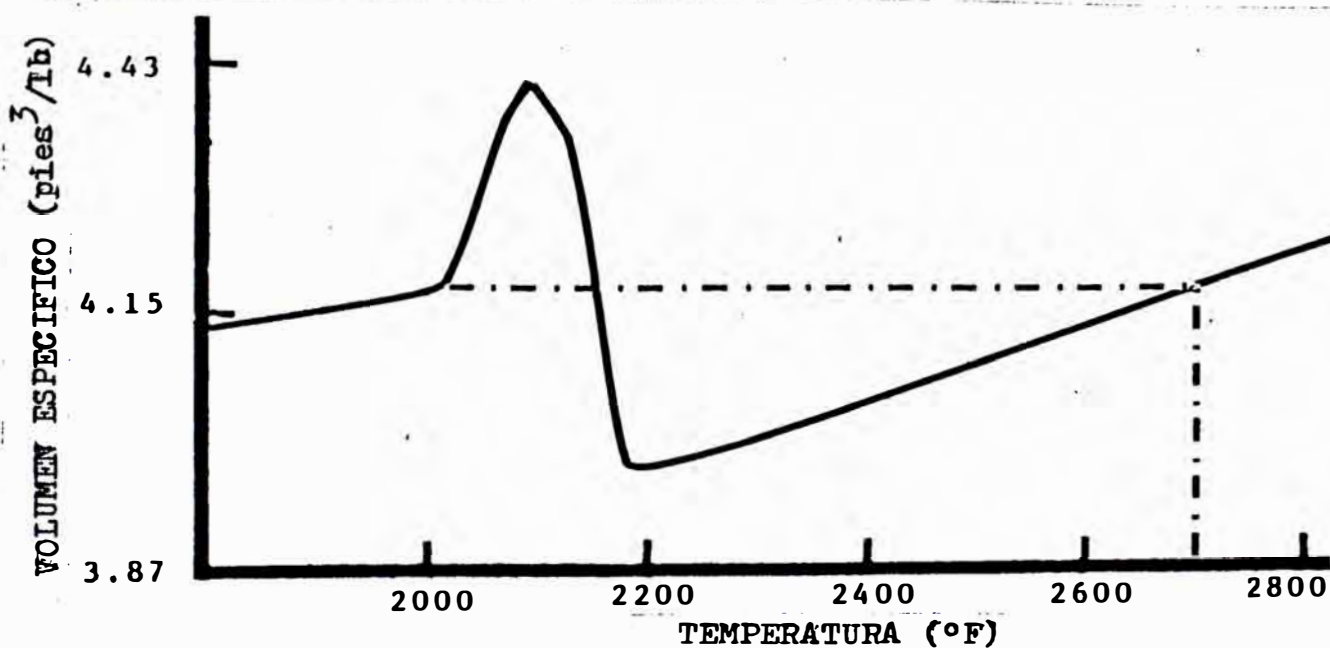


FIGURA 9.1

Los cambios en el volumen específico pueden causar cambios en el crecimiento del volumen de las piezas, debido a la expansión, succión o contracción interna debida a la contracción misma. Estos cambios de volumen pueden causar variaciones erráticas en las dimensiones de las piezas de fundición nodular. Sin embargo, esto puede minimizarse

hasta cierto punto usando moldes densos bien apisonados con una dureza del molde en el rango de 90. Debe recordarse que la fundición nodular es fuertemente inoculada y, de este modo, tiene una relativamente alta cantidad de nódulos y células. Este factor contribuye al, relativamente alto grado de expansión que ocurre en la fundición nodular cuando tiene lugar la formación de grafito.

La contracción del modelo en la fundición nodular depende de las siguientes consideraciones:

- Consistencia del procedimiento de tratamiento e inoculación.
- Composición del metal.
- Tamaño del nódulo.
- Cantidad de nódulos y tamaño de células.  
Estructura de la matriz.
- Consistencia de las propiedades de la arena de moldeo.
- Dureza del molde.
- Temperatura de vaciado.

Como es evidente, hay un gran número de variables que influyen la contracción dimensional de las piezas de fundición nodular. Sin embargo, si la contracción del modelo permanece constante, estos factores deben ser razonablemente consistentes. En piezas de ingeniería, la suficiente tolerancia de maquinado tendrá cuidado de pequeñas variaciones en la contracción. A continuación, trataremos algunas consideraciones sobre la contracción del modelo.

1) PERLITICA EN BRUTO DE COLADA.- Si la fundición nodular tiene una matriz perlítica en la condición de bruto de colada, esta contracción es similar a la fundición gris. La contracción del modelo es 0.15 pulg/pie. Cuando el componente es recocido a ferrita, este crece a casi 0.05 pulg/pie. De este modo, la contracción del modelo es similar a aquella de la fundición gris y esta en el rango de 0.15 pulg/pie a 0.10 pulg/pie.

2) FERRITICA EN BRUTO DE COLADA.- Un componente completamente ferrítico en la condición de bruto de colada será del mismo tamaño como el modelo. La contracción del modelo es 0 y como resultado se usa una regla standard (ninguna tolerancia para la contracción) para construir los modelos para producir fundición nodular

con una matriz ferrítica. Un pequeño % de perlita no afectará las dimensiones en bruto de colada. Sin embargo, se producirá un ligero crecimiento en las dimensiones si el componente es recocido.

3) RECOCIDO PARCIALMENTE CARBURICA.- Un componente de sección liviana que se produce en bruto de colada, en una condición blanca (carbúrica), se contraerá en el enfriamiento 0.20 pulg/pie. En un recocido total el fierro crecerá 0.30 pulg/pie tal que los componentes hechos de esta manera serán 0.10 pulg/pie mayores que el modelo usado para producirlos. Esto significa que debe usarse una regla de contracción del modelo de 0.10 pulg/pie menos que la regla standard, para producir componentes con las dimensiones finales deseadas.

Componentes que tienen secciones muy livianas que pueden ser blancas en bruto de colada y secciones gruesas que pueden ser perlíticas en bruto de colada, se torcerán durante el recocido. La sección liviana crecerá 0.30 pulg/pie y la sección gruesa crecerá solamente 0.05 pulg/pie, resultando una considerable distorsión. Debe elegirse la composición química adecuada y debe efectuarse una buena inoculación para asegurar una consistente estructura en toda la matriz. Esto es posible si se construye usando las 2 diferentes reglas de contracción para producir un componente satisfactorio después del recocido total.

4) RESTRICCIONES EN EL MOLDE Y EN EL ALMA.- Un componente intrincado no puede contraerse a su total potencial debido al alma o al molde que no se colapsan completamente o en parte. Sin embargo, no habrá restricción durante el recocido y este se expandirá de acuerdo a la estructura de la matriz del estado original. De este modo, un componente de sección liviana recocido puede ser considerablemente más grande que el deseado, como se indica a continuación.

Condición	Modelo (pulg)	Blanca en B. de C. (pulg)	Recocida (pulg)
Ninguna restricción	12.00	11.80	12.10
Alguna restricción	12.00	11.90	12.20
Fuerte restricción	12.00	12.00	12.30

## 9.2. MANIPULEO DEL METAL

Uno de los factores más importantes que deben considerarse en la producción de piezas sanas de fundición nodular, es el medio usado para colocar el metal dentro del molde. Con el cambio en la estructura del grafito a la forma esferoidal, evoluciona un metal ferroso completamente nuevo con su propia "personalidad y temperamento". Este metal no es semejante a la fundición gris, fundición maleable o acero, aún cuando tiene similitudes con todos ellos.

No obstante que el interés principal de este capítulo es la producción de piezas de calidad, desde un punto de vista del diseño del sistema de alimentación y el diseño de risers, es necesario que se comprendan las características básicas.

Amplias variaciones en la composición del metal, tratamiento del proceso y temperatura de vaciado, resultan en variaciones en las di mensiones de la estructura y la calidad de los componentes producidos. El control sobre la refinación del metal en la fusión, la temperatura del metal, el peso del metal tratado y la cantidad de la aleación de Mg usado efectivamente, se paga por completo en el producto final.

1) LIMPIEZA DEL METAL.- La cantidad de Mg necesario para producir grafito esferoidal en el fierro, origina la continua formación de un óxido u escoria sobre la superficie del metal fundido en las cucharas, similar a aquella formada en los bronce al Al o al Mn. Cantidades excesivas de Mg empleado en el tratamiento del fierro base con alto S, aumenta considerablemente la cantidad de óxidos y sulfuro de Mg presente en el fierro. Estos deben eliminarse con un adecuado escoriado del metal, antes de la fase de inoculación del proceso, de lo contrario se mezclará otra vez con el metal, creando el riesgo de atrapar a la escoria.

2) CUCCHARAS.- Teteras o cucharas de tipo similar, son esenciales para a segurar que sólo metal limpio ingresará al molde. Deben u sarse cucharas con pico de vaciado, aún cuando no son recomendables. Es de gran importancia la necesidad de un escoriado a fondo previo al va - ciado del metal dentro del molde. La adición de un coagulante de esco - ria a la superficie del fierro escoriado, ayudará a coagular la escoria restante y también hace una cubierta aislante para el fierro.

Cuando se tratan grandes cantidades de metal en grandes cucharas, el metal debe conservarse por un corto tiempo (4 a 5 minutos) a fin de permitir que la escoria se eleve a la superficie del metal donde esta puede ser eliminada. Es preferible emplear en las cucharas de vaciado un revestimiento básico o neutral de alta alúmina. Cucharas con revestimiento ácido o arcilla refractaria silicosa, reaccionan con el óxido y sulfuro de Mg, produciendo una rápida reversión a una estructura de grafito vermicular o laminar en el fierro tratado.

3) TEMPERATURAS DE TRATAMIENTO Y VACIADO.- La temperatura de vaciado de la fundición nodular es muy importante, en vista de que es un metal fácilmente oxidable. Cuando la temperatura cae por debajo de 1,400 °C, se incrementan los productos de oxidación. Se prefieren temperaturas superiores a 1,430 °C, debido a que el óxido está aún líquido y no presenta un peligro tan grande como el que originaría si estuviese en el estado sólido. A causa de las características de solidificación de la fundición nodular, que se detallará más adelante, la fluidez es muy buena. Esto a menudo es un disuasivo para producir componentes sanos y limpios; y los fundidores con frecuencia tienden a vaciar moldes tan largos ya que el metal fluirá.

Dado que la fundición nodular se produce por una serie de adiciones frías a la cuchara y que es deseable una temperatura de vaciado de 1,430 °C, es aparente que el fierro base previo al tratamiento debe estar a una temperatura considerablemente mayor. Por lo tanto, para óptimos resultados se recomienda que el fierro base antes del tratamiento debe estar a una temperatura en el rango de 1,510 °C a 1,570 °C.

Con el objeto de tratar el metal a esta temperatura y aún estar apto para vaciarse dentro del molde a una temperatura de 1,430 °C, es esencial que todas las cucharas y equipos esten calientes. Además, el metal debe manipularse pronta y convenientemente. Esto es particularmente importante cuando pequeñas cantidades de metal son tratados y manipulados a cualquier hora.

4) FUNDENTES Y COAGULANTES DE ESCORIA.- Se usan a menudo coagulantes de escoria para combinarse con la escoria líquida y en polvo, que están presentes en las cucharas de tratamiento y en las cucharas de vaciado justamente después de la inocula-



ción. Estos materiales se añaden a la superficie del metal en las cucharas en cantidades suficientes para combinarse con la escoria y luego se procede al escoriado.

La adición al metal de un fundente consistente de 50% de criolita y 50% de fluoruro de Na, durante la inoculación en la transferencia, ayuda a limpiar el metal de la escoria existente y suprime la adicional oxidación del metal. Es suficiente pequeñas adiciones de este fundente preparado. Dependiendo de la cantidad de metal tratado, la adición puede estar en el rango de 0.02% a 0.10%. Para grandes cantidades de metal, o donde se vacían grandes moldes, la adición del fundente al basín de vaciado es lo más efectivo.

### 9.3. MOLDEO

A fin de producir piezas de fundición nodular de calidad, son esenciales óptimas técnicas de moldeo. El tipo de arena usada, la magnitud del apisonado, el tipo y condición del equipo de la caja de moldeo usado, su condición y cuidado en el uso, todos juegan un papel muy importante en la fabricación de piezas satisfactorias.

1) MOLDEO CON ARENA EN VERDE.- La importancia de la preparación del molde con arena en verde puede apreciarse al recordar que la fundición nodular tiene una piel plástica tenaz y que algo de líquido está presente en toda la pieza durante la solidificación. Esta condición permite a la pieza deformarse o seguir el movimiento de las paredes del molde. Es preferible una dureza del molde superior a 90 para soportar adecuadamente al metal. Esto puede requerir una reducción en los finos para mantener una apropiada permeabilidad. Puede ser necesario aumentar la resistencia en caliente de la arena para resistir el prolongado estado fluido del metal, preferentemente por encima de 50 lbs/pulg<sup>2</sup>, a 538 °C - 815 °C. La deformación en verde y en seco debe controlarse por debajo de 0.02 pulg/pulg. El molde debe soportarse con chaquetas muy ajustadas o cajas de moldeo herméticas y con pesos adecuados para ayudar a reducir el movimiento de las paredes del molde. Habrá una considerable mejora en el rendimiento del molde si se siguen estas sugerencias.

El hecho que la fundición nodular es un metal eutéctico inocu

lado que ejerce por lo menos el doble de la presión en las paredes del molde ejercida por fundiciones grises normales, no puede ser minimizado. Por lo tanto, se requieren resistentes arenas con alta resistencia en caliente apisonadas a, por lo menos, una dureza del molde igual a 90, en moldes usados en la producción de piezas de fundición nodular.

Variaciones en el contenido de humedad de los moldes con arena en verde, contribuyen a la presencia de defectos por óxidos encontrados en las piezas. El % de humedad no es tan importante como el % de humedad por encima del punto "temper" de la arena. Una excesiva humedad producirá defectos por óxidos y pinholes.

Se ha determinado que el % de material carbonáceo en la arena afecta la cantidad de inclusiones de óxidos. La cantidad ideal es de 6% a 8% de material carbonáceo. La máxima cantidad de defectos se encuentran cuando el % de material carbonáceo es considerablemente bajo.

Arenas sintéticas aglomeradas con bentonita eliminan muchas de las variables encontradas en arenas naturales aglomeradas y como resultado de ello se obtendrán piezas con apariencia superior con pocos defectos superficiales.

2) MOLDES CON ARENA EN SECO.- Cuando se usa una práctica de moldeo con arena en seco, ocurre un grado mínimo de porosidades-pinholes y otras reacciones en la interfase del molde.

La deformación en la cavidad del molde juega un papel muy importante en el grado de contracción. En los moldes con arena en seco o estufados, esta variable se elimina. Usando una práctica de moldeo con arena en seco minimiza o elimina los defectos de lavados en el molde, bucles, darts y aquellos defectos producidos por la humedad. Almas carbonáceas y moldes pintados producen los acabados superficiales más satisfactorios. No deben usarse pinturas o recubrimientos del molde que contengan óxido de Fe, debido a que tales pinturas promueven la formación de pinholes.

3) MOLDEO EN CASCARA.- Gran cantidad de fundición nodular se produce en moldes en cáscara, con bastante éxito. Pueden obtenerse excelentes detalles y control dimensional bastante estrecho. Los moldes deben estar bien soportados debido a la característica de solidificación de la fundición nodular. Los productores indican que algu-

nos de los aglomerantes de las resinas que se conocen, se vuelven plásticos cuando el metal ingresa al molde y reduce la permeabilidad de la arena al grado que se observan en las piezas sopladuras o porosidades producidas por los gases.

4) MOLDEO CERAMICO O DE PRECISION.- Debido a la baja permeabilidad de estos moldes, es imposible desfogar el vapor de Mg producido por la fundición nodular en el estado fundido o durante la solidificación. Esto produce piezas con superficies ásperas y porosas.

#### 9.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACION

El sistema de alimentación es, probablemente, la parte más importante del molde. Esto requiere una especial atención a fin de producir piezas de fundición nodular sanas y limpias. Debe hacerse el intento para determinar la dirección en que el metal fluirá en el llenado del molde, para que pueda diseñarse el sistema de alimentación en el modelo individual. Las funciones que debe cumplir el sistema de alimentación, son las siguientes:

- a) Prevenir el ingreso de escoria y partículas extrañas a la cavidad del molde.
- b) Introducir el metal dentro de la cavidad del molde con un mínimo absoluto de turbulencia.
- c) Permitir que el metal fluya dentro de la cavidad del molde a una velocidad predeterminada.
- d) Establecer un gradiente térmico que promueva una solidificación progresiva, ubicando adecuadamente las entradas.

La principal diferencia entre los sistemas de alimentación para fundición gris y fundición nodular, es la tendencia a oxidarse y formar óxidos en la escoria o "dross". Esto se debe a la presencia de Mg y al contenido relativamente alto en Si que tiene la fundición nodular. Por esta razón, es necesario minimizar la turbulencia en el sistema de alimentación usado para producir piezas de fundición nodular al grado no necesario para las piezas de fundición gris. El resultado es un sistema de alimentación mucho más grande y la subsiguiente reducción en el rendimiento de fundición.

Los siguientes párrafos de este capítulo se refieren a la pre

sentación de información que puede emplearse en una forma organizada para el diseño del sistema de alimentación en piezas de fundición nodular. El peso de la pieza y su relación a la velocidad de vaciado, es la primera consideración al diseñar cualquier sistema de alimentación.

1) VELOCIDAD DE VACIADO.- En el caso de la fundición nodular es necesario usar sistemas de alimentación relativamente grandes, para minimizar la turbulencia que producirá la formación de óxidos, de este modo, la velocidad de vaciado a la cual el metal ingresa a la cavidad del molde, es razonablemente lenta. Las fórmulas publicadas de velocidad de vaciado para el llenado de las cavidades del molde, son empíricas. Estas se basan en máximas velocidades de fierro fundido y volúmenes que no erosionan los moldes de arena con resistencias y contenidos de arcilla normales en un rango dado de temperatura. La fórmula empírica original fue una ecuación establecida por H.W. Dietert en 1,926. Esta se basó en arenas naturales aglomeradas. Recientes evaluaciones en arenas sintéticas, han indicado solamente una ligera reducción en la velocidad de erosión para estos nuevos tipos de arena. La siguiente es una fórmula recientemente desarrollada para determinar la velocidad de vaciado, la cual sobre la base de la experiencia minimiza la erosión en las arenas sintéticas aglomerándolas con una combinación de bentonitas Oeste y Sur.

$$PT = (0.83 + 1.025 T) \sqrt{CW}$$

Donde:

PT = Tiempo de vaciado, en segundos.

T = Espesor de pared mínima de la pieza, en pulgadas.

CW = Peso de la pieza, en libras.

La Tabla 9.1, presenta los valores del tiempo de vaciado para piezas de hasta 1,000 lbs. en peso, con secciones de espesor mínimo de 1/8" hasta 1 1/2". La fórmula esta basada en temperaturas de vaciado en el rango de 1,370 °C a 1,454 °C.

2) ALTURA EFECTIVA DE LLENADO.- Este término se usa para representar un promedio de la carga ferrostática durante el vaciado, debido a que en la mayoría de casos la carga ferrostática cambia a medida que el molde se llena. Esto es cierto siempre que una configuración del sistema de alimentación es tal que el metal ingre-

TABLA 9.1.- TIEMPO DE VACIADO (seg.) PARA LA FUNDICION NODULAR. A TEMPERATURAS DE VACIADO DE 1,370 °C A 1,454 °C

Peso de pieza lbs.	Espesor mínimo de pared, en pulgadas									
	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	1	1 1/4	1 1/2
10	3.0	3.5	4.0	4.3	4.7	5.0	5.5	6.0	7.0	7.5
20	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.7	8.4	9.5	10.6
30	5.3	6.0	6.7	7.4	8.0	8.7	9.5	10.2	11.8	13.0
40	6.1	7.0	7.7	8.5	9.3	10.0	11.0	11.8	13.2	15.0
50	6.8	7.7	8.6	9.6	10.3	11.3	12.2	13.2	15.0	17.0
60	7.5	8.5	9.4	10.5	11.3	12.3	13.3	14.4	16.3	18.2
70	8.1	9.2	10.1	11.3	12.3	13.3	14.5	15.6	17.8	20.0
80	8.6	9.7	10.8	12.1	13.1	14.2	15.3	16.6	19.0	21.0
100	9.6	11.0	12.2	13.5	14.8	16.0	17.2	18.6	21.2	24.0
120	10.6	12.0	13.2	14.8	16.0	17.5	18.8	20.2	23.2	26.0
140	11.4	12.8	14.0	15.9	16.4	18.8	20.3	22.0	25.0	28.0
160	12.2	13.8	15.3	17.0	18.4	20.1	21.8	23.3	26.8	30.0
180	12.8	14.8	16.2	18.0	19.8	21.3	23.1	25.0	28.5	32.0
200	13.5	15.3	17.1	19.0	20.8	22.5	24.5	26.2	30.0	33.5
250	15.8	17.2	19.0	21.2	23.2	25.2	27.0	29.3	33.5	37.5
300	16.5	18.8	20.8	23.3	25.4	27.8	30.0	32.2	37.0	42.0
350	17.8	20.3	22.6	25.3	27.5	30.0	32.5	35.0	40.0	45.0
400	19.2	21.8	24.2	27.0	29.5	32.0	34.6	37.2	43.0	47.5
450	20.3	23.2	25.8	28.8	31.5	34.0	37.0	39.6	46.0	51.0
500	21.3	24.5	27.0	30.2	32.8	35.8	38.5	42.0	48.0	53.0
600	24.8	26.8	29.8	33.2	36.2	39.0	43.0	47.0	53.0	58.0
700	25.3	29.0	32.0	35.6	39.0	42.0	46.0	49.0	57.0	63.0
800	27.2	31.0	34.5	38.5	42.0	46.0	49.0	53.0	60.0	68.0
900	28.8	32.8	36.2	41.0	44.0	48.0	52.0	56.0	64.0	72.0
1,000	30.5	35.0	38.5	43.0	47.0	51.0	55.0	59.0	68.0	76.0

sa a la cavidad del molde, por debajo de la elevación de la parte superior de la cavidad del molde. Las Figuras 9.2, 9.3 y 9.4, presentan esta condición gráficamente.

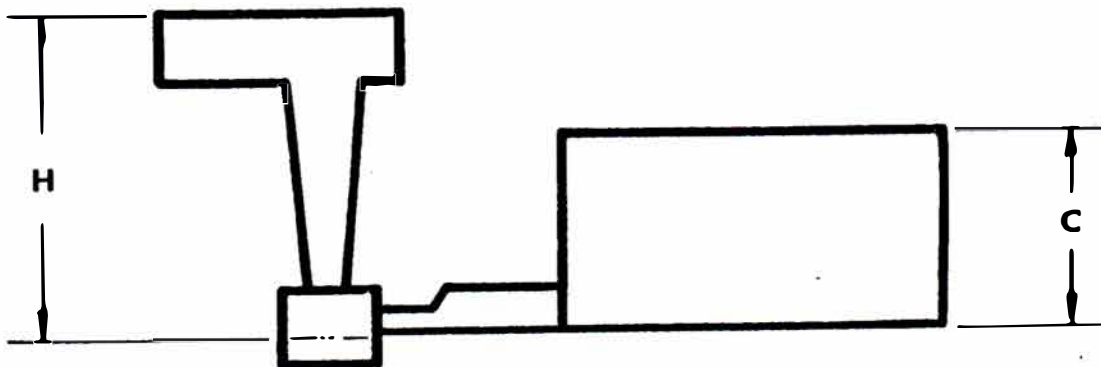


FIGURA 9.2

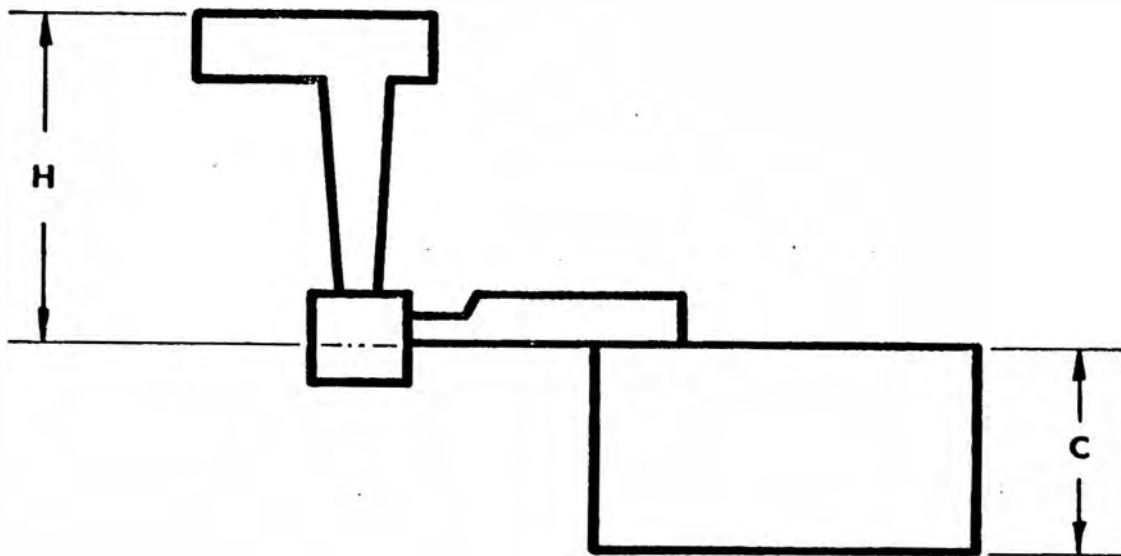


FIGURA 9.3

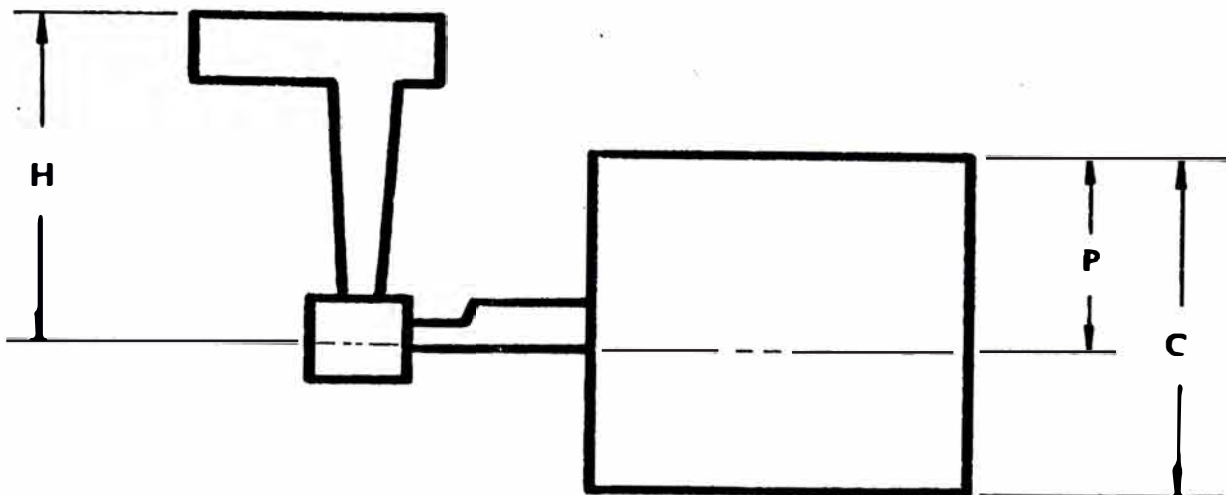


FIGURA 9.4

La Figura 9.3, presenta un molde con entradas en la parte superior de la cavidad de la pieza, en este caso la carga ferrostática es constante.

La fórmula básica usada para determinar la altura efectiva de llenado necesaria para llenar una cavidad del molde, es la siguiente:

$$ESH = H - (P^2)/2 C$$

Donde:

ESH = Altura efectiva de llenado.

H = Distancia del choke (choque) a la parte superior del bebedero o basín de vaciado.

P = Altura de la pieza por encima del choke.

C = Altura de la pieza en el molde.

La Figura 9.4, ilustra los términos usados en el cálculo de la altura efectiva de llenado (ESH).

3) AREA DE CHOKE.- Es el área mínima de sección transversal en cualquier sistema de alimentación. En el caso de un sistema a presión (presurizado), el área de choke es igual a la suma de todas las áreas de sección transversal de las entradas.

$$CA = \frac{0.33 \times WP}{.PT \times \sqrt{ESH}}$$

Donde:

CA = Area de choke, en pulg<sup>2</sup>.

WP = Peso vaciado, en lbs. Incluye el peso de pieza más el peso estimado de canales y risers.

PT = Tiempo de vaciado, en seg.

ESH = Altura efectiva de llenado, en pulg.

La Tabla 9.2, presenta la relación de las áreas de sección transversal, en pulg<sup>2</sup>, para canales de colada circulares, cuadradas y rectangulares, comúnmente usadas en los sistemas de alimentación.

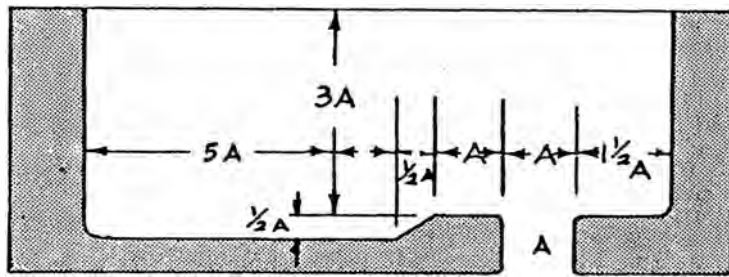
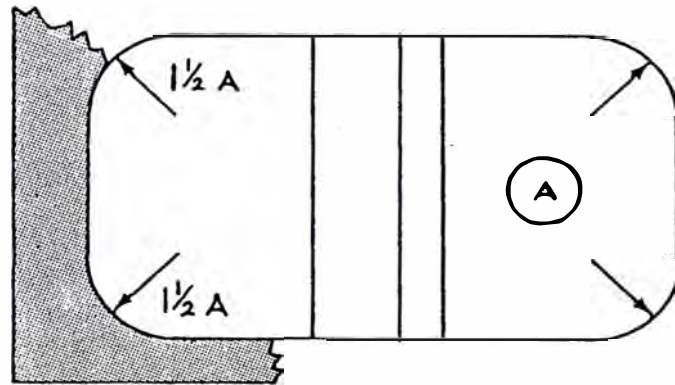
4) BASINES DE VACIADO.- Es muy importante incorporar un basín de vaciado adecuadamente diseñado en el sistema de alimentación. En muchos casos esto se ignora, lo que origina un sistema de alimentación que produce resultados erráticos e impredecibles. Un eficiente basín de vaciado debe diseñarse para que este pueda llenarse rápidamente. Debe tener suficiente altura para que el bebedero no forme un remolino y aspire aire y escoria dentro de la pieza. En la Figura 9.5, se presentan basines de vaciado adecuadamente dimensionados. Aún cuando, se prefieren los basines de vaciado con arena seca, pueden apisonarse en la mitad superior del molde (tapa), basines de vaciado con arena en verde.

5) CANALES DE COLADA Y ENTRADAS.- Un sistema de alimentación moderadamente a presión, con una relación del área del bebedero, canal de colada y entrada o ataque, de aproximadamente 4:8:3 ó 2:4:1, ha producido consistentemente piezas de calidad en todos los rangos de tamaño. La Figura 9.6, es una ilustración gráfica del

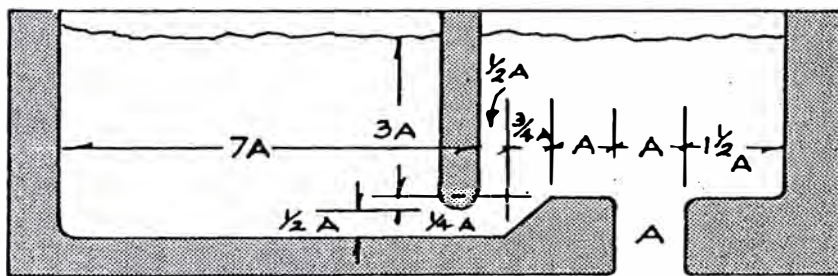
TABLA 9.2.- AREAS DE SECCION TRANSVERSAL DE BEBEDEROS Y CANALES DE COLADA, PARA ALGUNAS DIMENSIONES COMUNES EN LOS SISTEMAS DE ALIMENTACION

Diámetro de redondo o lado del cuadrado pulg	Area del bebedero pulg <sup>2</sup>		Canal de colada rectangular, pulg		Area del canal de colada, pulg <sup>2</sup>
	Redondo	Cuadrado	Ancho	Alto	
1/4	0.049	0.063	1/2	1/2	0.250
1/2	0.196	0.250	1/2	3/4	0.375
9/16	0.249	0.316	1/2	1	0.500
5/8	0.307	0.391			
11/16	0.371	0.473	5/8	5/8	0.307
			5/8	1	0.625
3/4	0.442	0.563	5/8	1 1/4	0.781
13/16	0.519	0.660			
7/8	0.601	0.766	3/4	3/4	0.442
15/16	0.609	0.879	3/4	1	0.750
			3/4	1 1/4	0.937
1	0.785	1.000	3/4	1 1/2	1.125
1 1/16	0.887	1.129			
1 1/8	0.994	1.266	7/8	7/8	0.765
1 3/16	1.108	1.410	7/8	1 1/8	1.094
			7/8	1 1/2	1.313
1 1/4	1.227	1.563	7/8	1 3/4	1.531
1 5/16	1.353	1.723			
1 3/8	1.485	1.890	1	1	1.000
1 7/16	1.623	2.066	1	1 1/4	1.250
			1	1 1/2	1.500
1 1/2	1.767	2.250	1	1 3/4	1.750
1 9/16	1.918	2.441	1	2	2.000
1 5/8	2.074	2.640			
1 11/16	2.237	2.848	1 1/4	1 1/4	1.563
			1 1/4	1 1/2	1.875
1 3/4	2.405	3.063	1 1/4	2	2.500
1 13/16	2.580	3.285	1 1/4	2 1/2	3.120
1 7/8	2.761	3.516			
1 15/16	2.948	3.754	1 1/2	1 1/2	2.250
			1 1/2	2	3.000
2	3.142	4.000	1 1/2	2 1/2	3.750
			1 1/2	3	4.500





A



B

FIGURA 9.5.- Balsas o basines de vaciado.

sistema presentando la relación de las áreas de sección transversal de un sistema de alimentación.

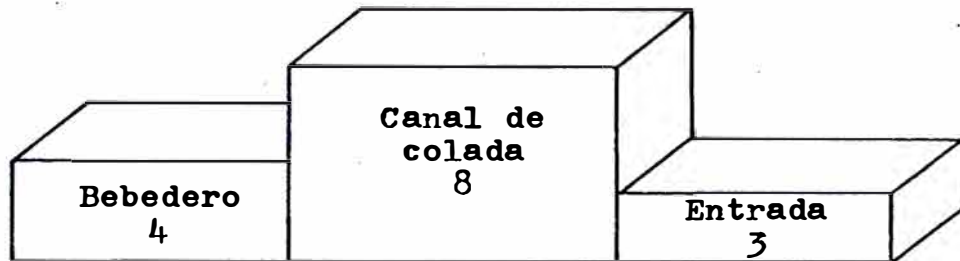


FIGURA 9.6

Este diseño tiene como objeto la reducción de la velocidad del metal en el canal de colada, para permitir que la escoria se eleve y sea atrapado en el canal de colada.

En un efectivo sistema de alimentación, es necesario un bebedero ahusado, tal como se muestra en la Figura 9.7, para minimizar la aspiración de aire en el chorro de metal. Un basín localizado en la base del bebedero de aproximadamente el doble de la altura del canal de colada y por lo menos 4 o 5 veces el diámetro del choke, minimizará la turbulencia a medida que el metal cambia de dirección y fluye dentro de los canales de colada y entradas o ataques.

En los canales de colada usados en los sistemas de alimentación para la fundición nodular, es deseable que la altura sea aproximadamente el doble del ancho para que las inclusiones puedan separarse más efectivamente del metal y ser atrapadas.

Usualmente, en este sistema de alimentación el área de choke se localiza en la unión del canal de colada y las entradas. Se obtienen mejores resultados usando un ahusamiento de  $3^\circ$ , desde este punto a la unión de la entrada con la pieza. Esto tiende a reducir la velocidad del metal a medida que este ingresa a la cavidad del molde. Las entradas deben estar siempre localizadas a fin de que el metal pueda fluir fácilmente dentro y a través de la cavidad del molde, sin obstrucciones o choque. A menudo, son deseables las entradas tangenciales en piezas delgadas, para evitar el choque directo sobre las paredes internas.

FIGURA 9.7.- Típico sistema de alimentación.

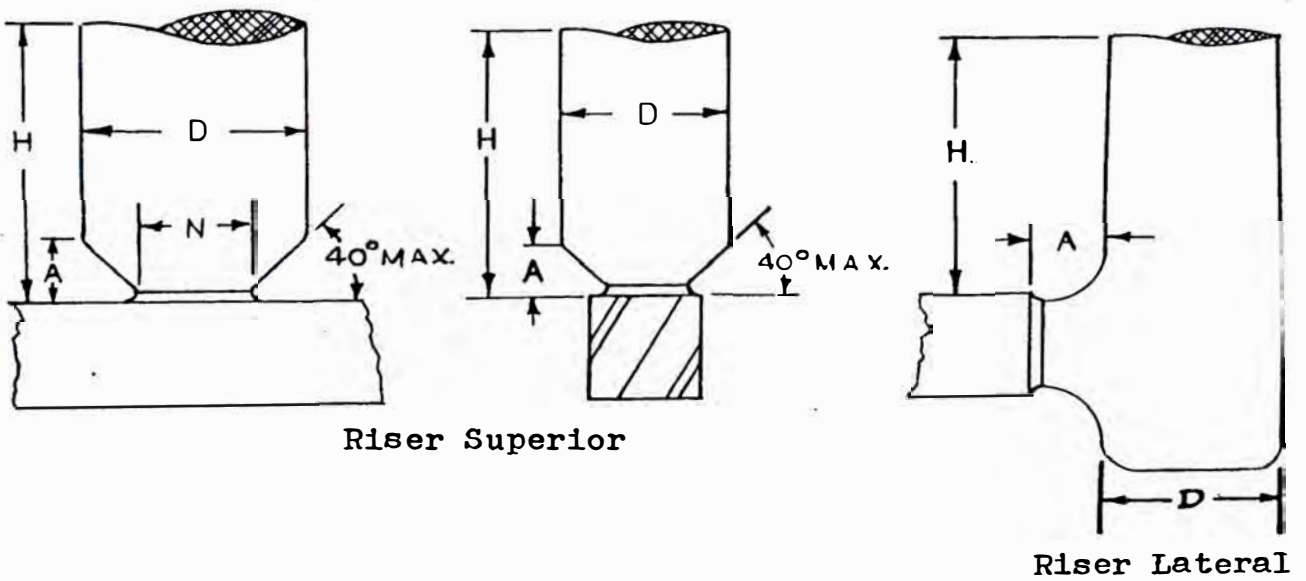
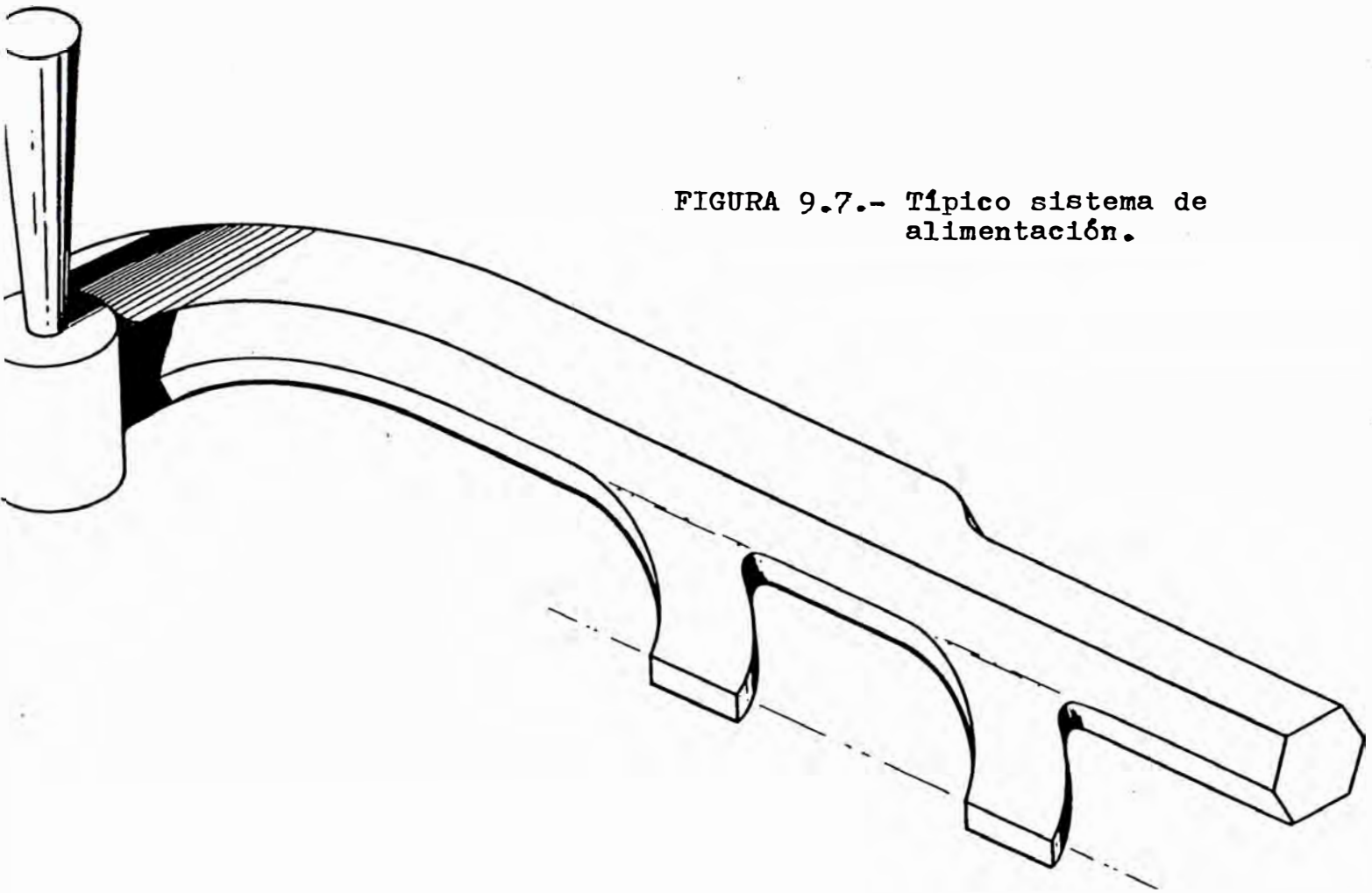


FIGURA 9.8.- Risers en la fundición nodular.

6) ETAPAS EN EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALIMENTACION.- La primera etapa en el diseño de un sistema de alimentación es determinar el punto por el cual el metal debe ingresar al molde. Hay muchas opiniones variadas sobre esta consideración particular. La información a presentarse será usada como una guía ajustada con el criterio y la experiencia práctica. A menudo, es deseable promover la solidificación progresiva en piezas con entradas en las secciones delgadas. Sin embargo, hay situaciones que requieren entradas a través de risers en secciones gruesas o uniformes, para eliminar contracciones (rechupes) en ciertas configuraciones de las piezas.

La siguiente etapa es determinar la velocidad con el que el molde debe vaciarse. Esto se hace usando la fórmula siguiente:

$$PT = (0.83 + 1.025 T) \sqrt{CW}$$

ó los datos proporcionados en la Tabla 9.1. Luego se determina el choke o área de entrada, calculando primero la altura efectiva de llenado.

$$ESH = H - \frac{P^2}{2C}$$

La tercera y última etapa es diseñar el resto del sistema de alimentación. Esto incluye: bebedero, canales de colada y entradas. Las dimensiones de estos se determinan sobre la base de relaciones establecidas que producen piezas limpias.

#### 9.5. DISEÑO DE RISERS

Es de vital importancia para realizar un adecuado diseño de risers, el conocimiento de las características de contracción de la fundición nodular. Esta no solidifica en forma similar a los otros metales ferrosos que solidifican progresivamente desde la superficie interna. Existe metal líquido en la superficie excepto en la tenaz piel plástica durante, prácticamente, el proceso completo de solidificación. Esto es debido al hecho que la fundición nodular es, esencialmente un metal eutéctico. La fundición nodular tiende hacia la solidificación instantánea y el grueso de la contracción ocurrirá si no está estrechamente limitado por un molde duro denso.

La contracción volumétrica total de la fundición nodular, es

una función de 4 factores:

- a) Contracción líquida.
- b) Contracción de solidificación.
- c) Deformación de la cavidad del molde.
- d) Precipitación del grafito.

En vista de que la fundición nodular es básicamente un fierro hipereutéctico, en el enfriamiento, algo del C precipita como grafito con un aumento de volumen que requiere de un espacio adicional. Esta característica contrarresta la contracción líquida resultante en el enfriamiento.

Si el metal es vaciado con cierto grado de sobrecalentamiento, el % de contracción líquida se incrementa en 0.825% por cada 55.6 °C por encima de la temperatura de solidificación o 4.13% para una pieza vaciada a 1,427 °C.

La contracción de solidificación se estima en casi 3.00% para la fundición nodular.

La deformación de la cavidad del molde juega un papel muy importante en la contracción de las piezas de fundición nodular y puede esperarse que tenga un valor promedio de 5% a 7% para arenas en verde, dependiendo de la dureza del molde.

El volumen que se incrementa en una fundición nodular con un contenido de C en el rango de 3.60% a 3.80%, será aproximadamente de 10.5% a 10.8%.

Si todos los diversos factores involucrados en la contracción total son sumados, esto nos indicará que risers son necesarios en las piezas de fundición nodular en los moldes de arena en verde, como se muestra a continuación:

1.- Contracción líquida desde 1,427 °C	4.13%
2.- Contracción de solidificación.	3.00%
3.- Deformación de la cavidad del molde.	<u>6.00%</u>
Deformación total de la cavidad	13.13%
4.- Incremento de volumen debido a la precipitación	- <u>10.60%</u>
Metal requerido desde los risers	2.53%

La cantidad de metal alimentado requerido en las piezas de fundición nodular y suministrado por los risers, varía de una fundición a otra y de un método de moldeo a otro. Los requerimientos reales de metal alimentado depende del tipo del medio de moldeo usado y sus características. La siguiente información está referida con moldes de arena en verde, con durezas de molde de aproximadamente 90 y temperaturas de metal en el rango de 1,371 °C a 1,427 °C. Esta se basa en datos empíricos desarrollados por fabricantes de fundición nodular, sobre un período de muchos años de experiencia. Los tamaños de los risers se basan en las siguientes consideraciones aproximadas.

D Diámetro del riser = Sección de la pieza + 2"

H (1) Altura del riser = 2 x Diámetro del riser para secciones superiores a 1.5"

H (2) Altura del riser = Sección + Diámetro del riser (o metal alimentado requerido)

L Longitud máxima del neck = Diámetro del riser/3

N Abertura del neck = Sección o ligeramente menor

Estas fórmulas proporcionarán indicaciones de cantidades aproximadas de metal alimentado suministrado por los risers:

$$\text{Entrada por los risers} = \frac{\text{Peso del riser}}{3.0 \text{ a } 3.5}$$

$$\text{Riser lateral} = \frac{\text{Peso del riser}}{4.0 \text{ a } 4.5}$$

$$\text{Riser superior} = \frac{\text{Peso del riser}}{5.0 \text{ a } 5.5}$$

En general, no se requieren risers en secciones menores a 0.25", excepto en esquinas y otros puntos calientes. Incrementando la longitud del riser y reduciendo el tamaño de la abertura del neck, a menudo se eliminará la contracción en la entrada. Usualmente, los diámetros de los risers son iguales a 2" de metal fundido, además del tamaño de la sección, creando el rechupe necesario para suministrar el metal alimentado, como se indica en la Figura 9.8.

C A P I T U L O   X .- INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE SECCION SOBRE  
LA MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECA-  
NICAS DE LA FUNDICION NODULAR

## 10.1. EFECTO DEL TAMAÑO DE LA SECCION SOBRE LA VELOCIDAD DE SOLIDIFICACION

Muchos investigadores continúan explorando las características de solidificación de los metales fundidos. Sus experimentos y estudios han desarrollado fórmulas útiles para interpretar la influencia de la sustracción de calor sobre la pieza a medida que ésta es enfriada por el medio del molde. Mucho de estos datos acumulados han sido relacionados por la "regla de Chvorinov" que establece que el tiempo que el metal permanece en la condición fundida es proporcional al cuadrado de la relación del volumen de la pieza a su área superficial. Posteriormente, fue incorporado un factor de forma.

Regla de Chvorinov:

$$T = \frac{1}{K^2} \left( \frac{V}{SA} \right)^2$$

Donde:

K = Factor de forma variable

Se han realizado estudios de solidificación para explorar la velocidad de solidificación, por medición de temperaturas en ángulos rectos a la cara del molde y del metal, durante esta solidificación. Análisis matemáticos complejos y flujos de calor empleando técnicas análogas eléctricas, se han explorado en estudios de velocidad de solidificación. Mucho de los datos acumulados consideran la influencia de la forma, el efecto de las "esquinas" y el grado de sobrecalentamiento del baño.

¿Cuánto influye el espesor de la sección sobre el tiempo de solidificación, para una pieza en forma de una simple placa? Una placa de 6" de largo x 3" de ancho x 1" de espesor, tendrá un volumen de (6 x 3 x 1 =) 18 pulg<sup>3</sup> con (6 x 3 + 6 x 3 + 6 x 1 + 6 x 1 + 3 x 1 + 3 x 1 =) 54 pulg<sup>2</sup> de área superficial. Una placa de 6" de largo x 3" de ancho x 1/4" de espesor, tendrá un volumen de 4.5 pulg<sup>3</sup> y su área superficial será 41.5 pulg<sup>2</sup>. La relación de volumen a área superficial para la placa de 1" de espesor será (18/54 =) 0.333 y para la placa de 1/4" de espesor será (4.5/41.5 =) 0.108. La relación V/A al cuadrado será 0.111 para la placa de 1" de espesor y 0.012 para la placa de 1/4" de espesor. La relación (V/A)<sup>2</sup> para una placa de 6" x 3" x 1/2" será 0.040. De este modo, el tiempo de solidificación para la placa de 1/4" de espesor es



casi 4 veces más rápido que la placa de 1/2" de espesor y 10 veces más rápido que la placa de 1" de espesor.

Según la regla de Chvorinov, es obvio que placas delgadas con gran área superficial en relación al volumen, solidificarán mucho más rápidamente que los cuadrados o redondos. El tiempo de solidificación para diversas formas de piezas de acero en moldes de arena, se presenta en la Figura 10.1. El tiempo de solidificación para cubos de fundición modular de diversos tamaños, se ilustra en la Figura 10.2. Debemos capitalizar estos esfuerzos y adicionales investigaciones guiarán nuestra gestión para refinar las técnicas de producción de piezas de fundición modular de secciones delgadas en bruto de colada.

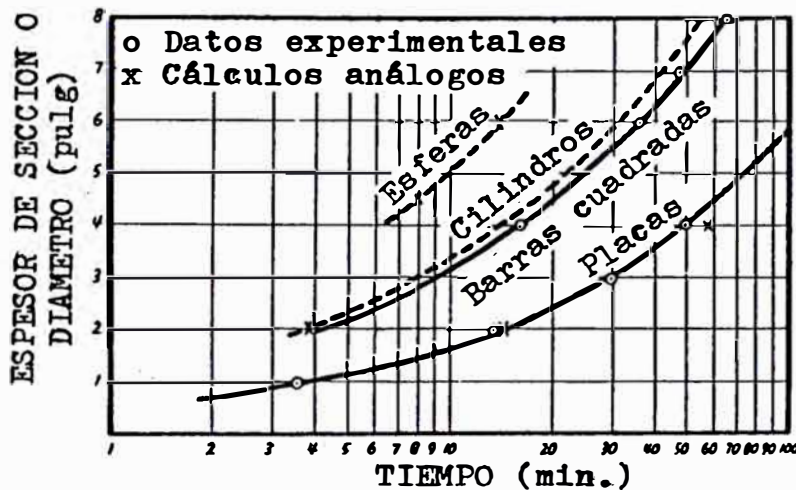


FIGURA 10.1.- Tiempo de solidificación de piezas de diversas formas, de acero fundido en moldes de arena.

El hierro solidifica sobre un amplio rango de temperaturas. La solidificación comienza en el liquidus y se completa cuando la temperatura cae por debajo del solidus. La velocidad de enfriamiento y solidificación, depende de las características de absorción de calor, del molde. La solidificación del metal se inicia en la interfase molde-metal y es más rápida en las esquinas externas, menos rápida en las esquinas entrantes o en puntos calientes originados por el diseño de la pieza. Un hierro hipoeutéctico comienza a solidificar como dendritas primarias de austenita, mostrada como una primera interrupción o cambio de pendiente en la curva de enfriamiento. La completa solidificación ocurre en o por debajo de la temperatura eutéctica austenita-grafito, pre-

sentada por una segunda interrupción o parada en la curva de enfriamiento. La fundición nodular exhibe un mayor grado de sobreenfriamiento que la fundición laminar (6 °C a 22 °C o más).

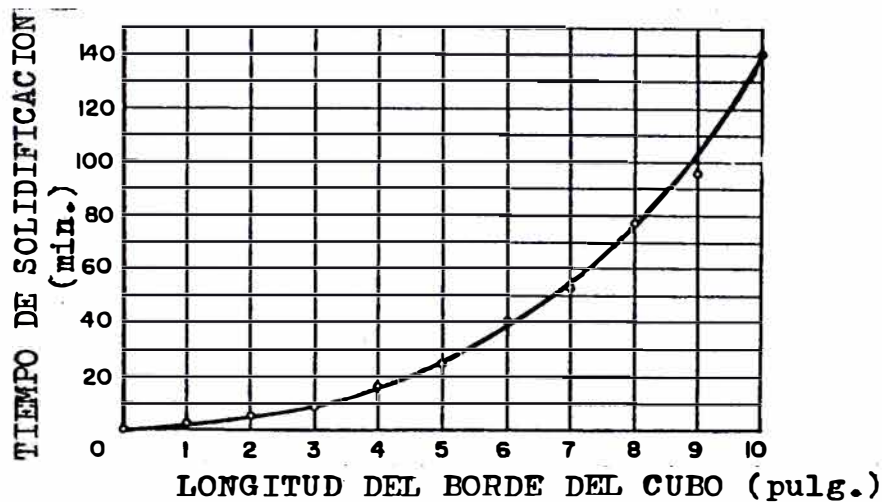


FIGURA 10.2.- Tiempo de solidificación para cubos de fundición nodular de diversos tamaños. Temperatura de vaciado: 1,427 °C.

El grado de sobreenfriamiento es mucho mayor en secciones delgadas y es ocasionado por la más rápida velocidad de enfriamiento. La inoculación estrecha ligeramente los gradientes de temperatura a través de la sección, retarda la influencia del intervalo de aire (air gap), aumenta la sustracción de calor reduciendo el sobreenfriamiento e incrementa el tiempo para la solidificación eutéctica. Los esferoides se precipitan desde el líquido inestable sobreenfriado de composición eutéctica. La velocidad de nucleación se incrementa por cierto grado de sobreenfriamiento. Sin embargo, un gran sobreenfriamiento retarda la nucleación y se encontrarán carburos masivos. Altas temperaturas de vaciado afectan el inicio de la solidificación y ejercen una fuerte influencia sobre las características de solidificación.

La sustracción de calor y la velocidad del flujo de calor, dependen de la conductividad térmica y la capacidad de absorción de calor, del medio del molde. En el vaciado el molde se calienta, de este modo reduce la diferencia de temperaturas entre el hierro y el molde. A medida que el molde, en la interfase con el metal se vuelve más caliente, se reduce la velocidad de enfriamiento de la pieza.

Las velocidades de enfriamiento para una pieza en molde perma

nente o en un metal fundido contra un chill, son extremadamente rápidas y reflejan cambios drásticos en la microestructura. En comparación, los moldes de arena son relativamente aislantes. Sin embargo, la influencia del molde en piezas de secciones delgadas, esto es, menores que 1/4", donde la relación  $(V/A)^2$  es menor que 0.100, es un tributo al talento de los mejores fundidores para producir piezas libres de carburos. La influencia de los moldes de arena sobre la velocidad de enfriamiento de la pieza disminuye a medida que la masa aumenta. La influencia del contenido de humedad en los moldes de arena en verde es largamente anulado, a medida que aumenta el tamaño de la sección.

## 10.2. EFECTO DE LA PIEZA FUNDIDA SOBRE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO

Una vez que la pieza se ha vaciado, la velocidad de enfriamiento en el molde ejerce una potente influencia sobre la microestructura del metal. Más específicamente, la velocidad a la cual la pieza se enfría a través de la temperatura crítica inferior donde se transforma la austenita, determina la estructura resultante. La velocidad determinará si la pieza tendrá una matriz esencialmente perlítica o una matriz esencialmente ferrítica. Enfriamientos más rápidos promueven la perlita, enfriamientos lentos permiten que la austenita se transforme a ferrita con grandes esferoides. Este efecto sobre la microestructura puede observarse en la Figura 10.5. La sección de 1/8" solidifica con una estructura carbúrica, con el incremento en el tamaño de la sección, la matriz se vuelve esencialmente ferrítica.

El tiempo de desmoldeo después del vaciado, determina la estructura y la dureza de las piezas superiores a 1/4". Este efecto es, particularmente evidente en unidades de moldeo de alta producción. Se ha reportado que secciones de 5/8" tenía valores de dureza Brinell 70 números más alto que una sección de 1/4" de la misma pieza y que fue desmoldeada 20 minutos después del vaciado. Las secciones más gruesas o aquellas secciones adyacentes a las entradas y risers gruesos que retienen calor, estaban a temperaturas por encima de la crítica inferior y fueron normalizadas. Esta influencia del desmoldeo sobre los constituyentes de la matriz, es similar a la descrita en la Sección 11.1 del Capítulo XI.

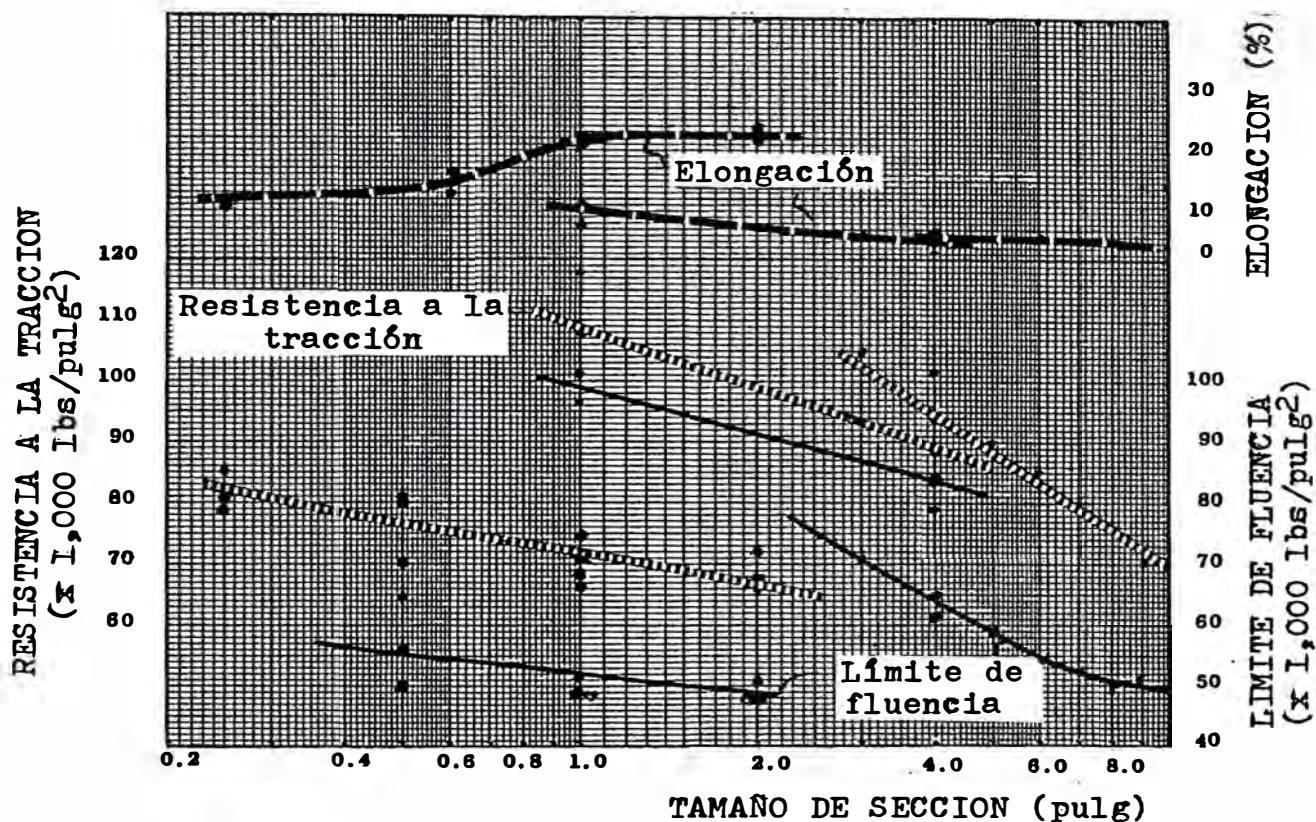


FIGURA 10.3.- Efecto del tamaño de sección sobre las propiedades mecánicas de la fundición nodular, en bruto de colada.

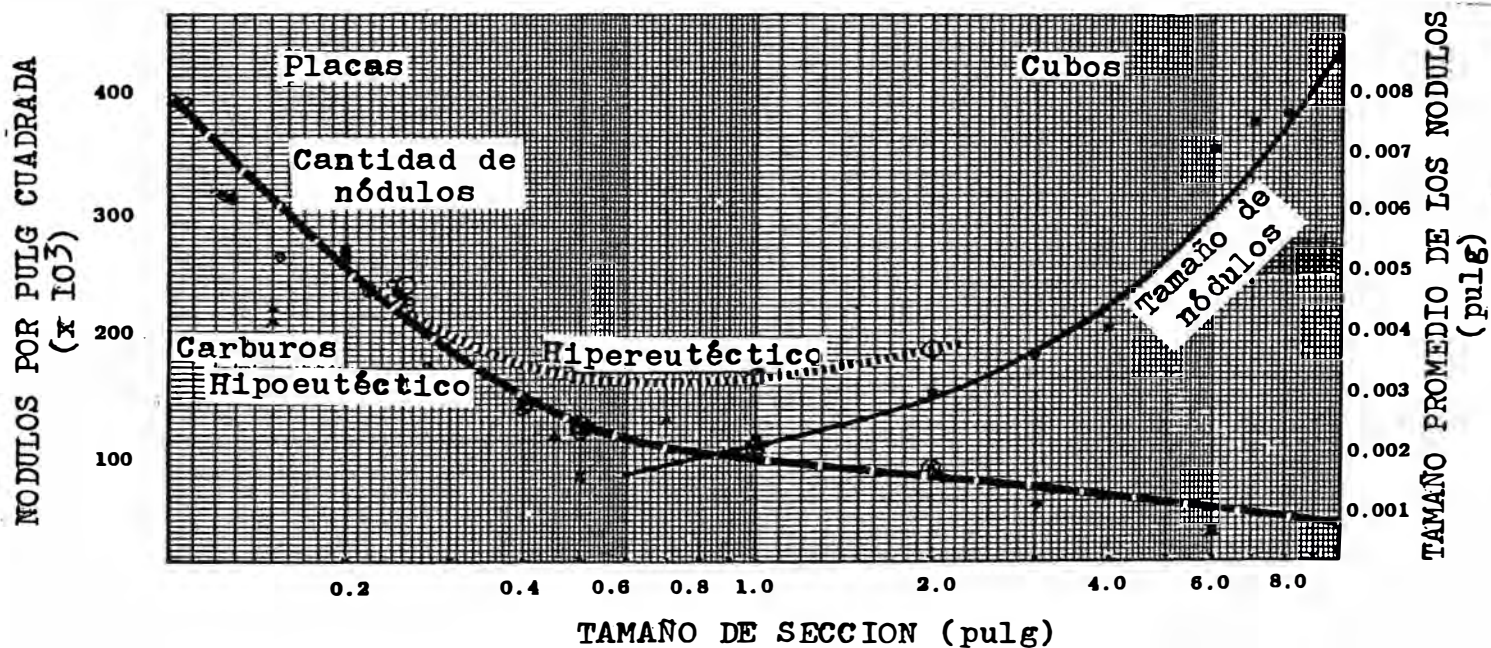


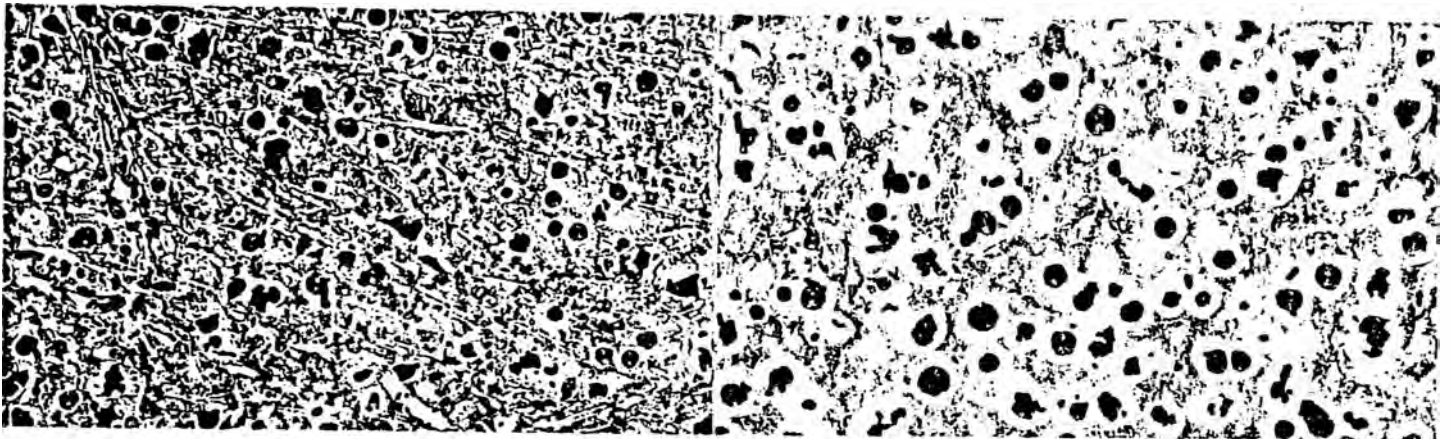
FIGURA 10.4.- Efecto del tamaño de sección sobre la cantidad y tamaño de los nódulos, en la fundición nodular.

### 10.3. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE SOLIDIFICACION SOBRE LA CANTIDAD DE NODULOS

La cantidad de nódulos aumenta rápidamente con el incremento en la velocidad de solidificación, a medida que disminuye el tamaño de la sección. La cantidad de nódulos se obtiene contando los esferoides que están dentro del campo del microscopio o en una microfotografía y calculándolo para un denominador de área común. Los datos siguientes se calculan para el número de nódulos por pulgada cuadrada. La cantidad de nódulos promedio para una sección de 1/8" de espesor, que esencialmente es una pieza en forma de placa libre de carburos, de hierro hipoeutético, es igual a 400,000 nodulos/pulg<sup>2</sup>; para espesores de 7/32", es aproximadamente 225,000; para 1/2", alrededor de 125,000; para 1", casi 90,000. En piezas gruesas cúbicas, la cantidad de nódulos para una sección de 2" es casi 75,000, para una sección de 4" es 50,000 nódulos por pulg<sup>2</sup> y para una sección de 8" es aproximadamente 35,000 nódulos/pulg<sup>2</sup>. Estos datos son ploteados en la Figura 10.4.

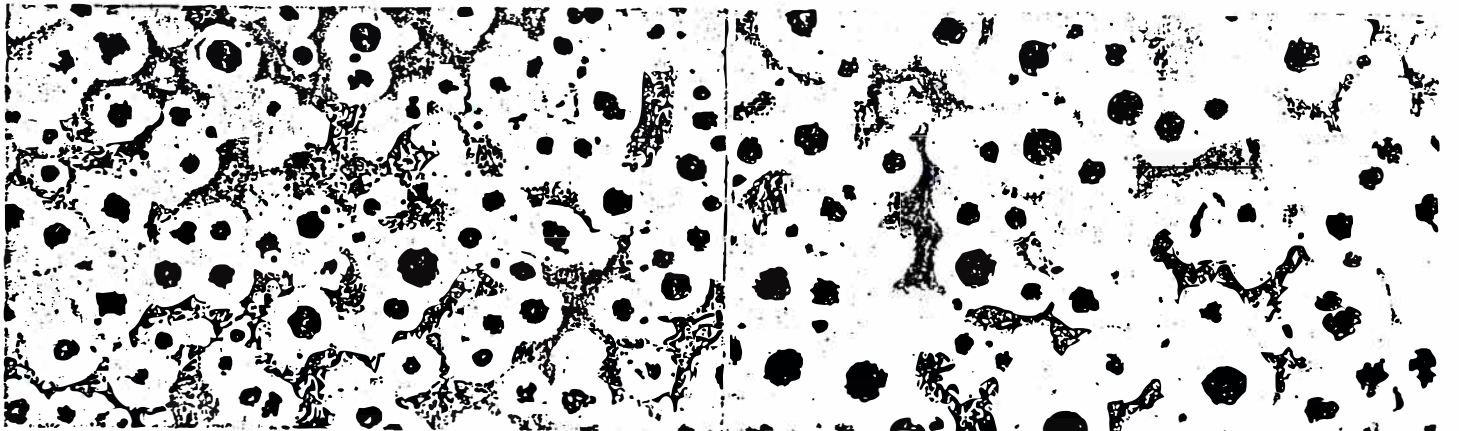
Con rápidas velocidades de solidificación, es alta la cantidad de nódulos y los esferoides son pequeños. La cantidad de C total disponible permanece igual, de aquí que con lentas velocidades de solidificación y pocos nódulos, los esferoides son mucho más grandes. Al mismo tiempo, las estructuras en bruto de colada pueden contener más ferrita y el tamaño de los esferoides puede, además, agrandarse por el C ganado por la descomposición del Fe<sub>3</sub>C de la perlita. El tamaño medio de los nódulos observados en diversas secciones se plotea en la Figura 10.2. La influencia de los espesores de sección sobre el tamaño de los nódulos puede verse en la Figura 10.5.

La cantidad de nódulos para composiciones hipereutéticas es, también, ploteado en la Figura 10.3. Como se mencionará en el Capítulo XII, más de un nódulo puede existir por cada célula eutética en los fierros hipereutéticos. Los fierros nodulares hipoeutéticos tienen alrededor de 80,000 células eutéticas por pulg<sup>2</sup> en el punto medio de una barra circular de 1 1/8", mientras que una fundición gris inoculada de Clase 40 tiene aproximadamente 3,500 células eutéticas por pulg<sup>2</sup> en el punto medio de una sección igual. Fundiciones nodulares típicas tienen alrededor de 20 veces el número de células en el centro de una fundición gris, en secciones de tamaños equivalentes.



Sección de 1/8" en bruto de colada

Sección de 1/4" en bruto de colada



Sección de 1/2" en bruto de colada

Sección de 1" en bruto de colada

FIGURA 10.5.- Efecto del aumento del tamaño de sección sobre la matriz en bruto de colada. Muestras atacadas con Nital 2% a 100 X.

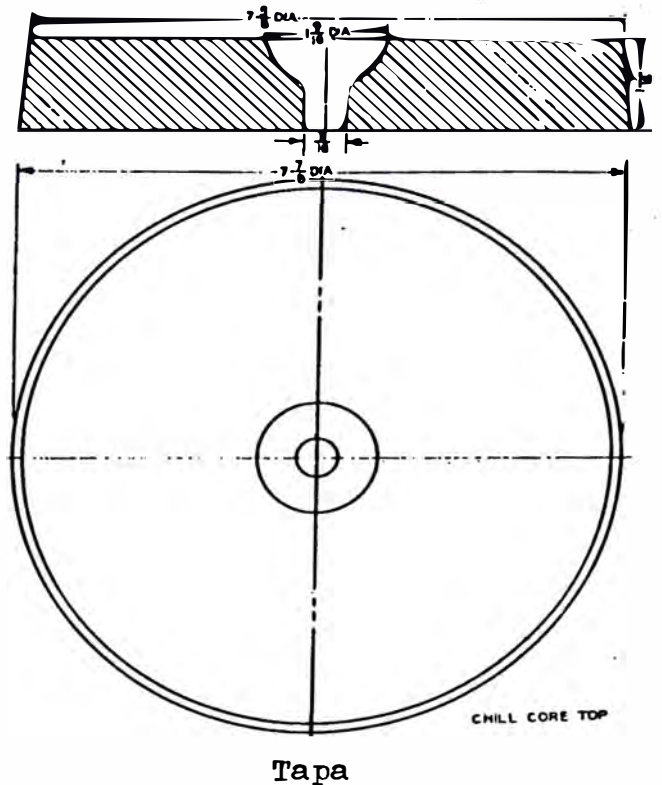
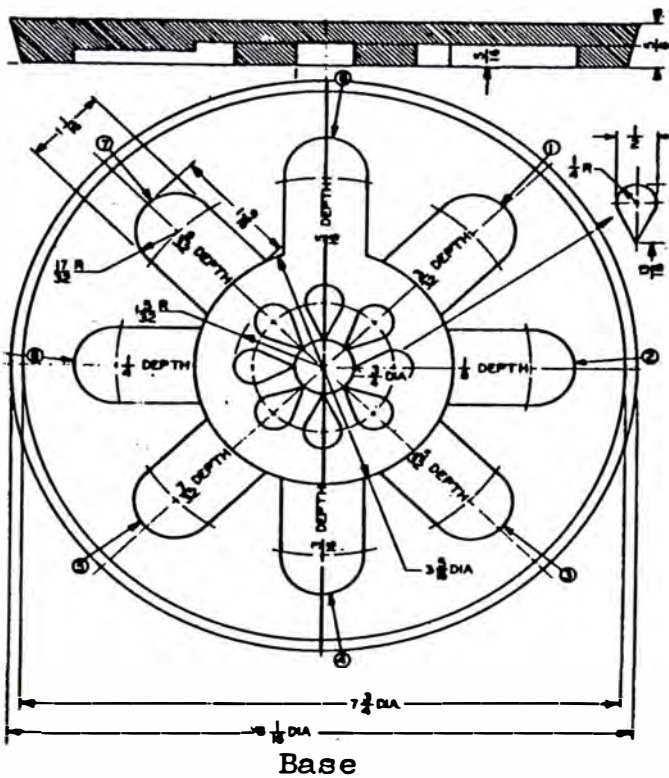


FIGURA 10.6.- Ensayo en almas, de la sensibilidad a la sección

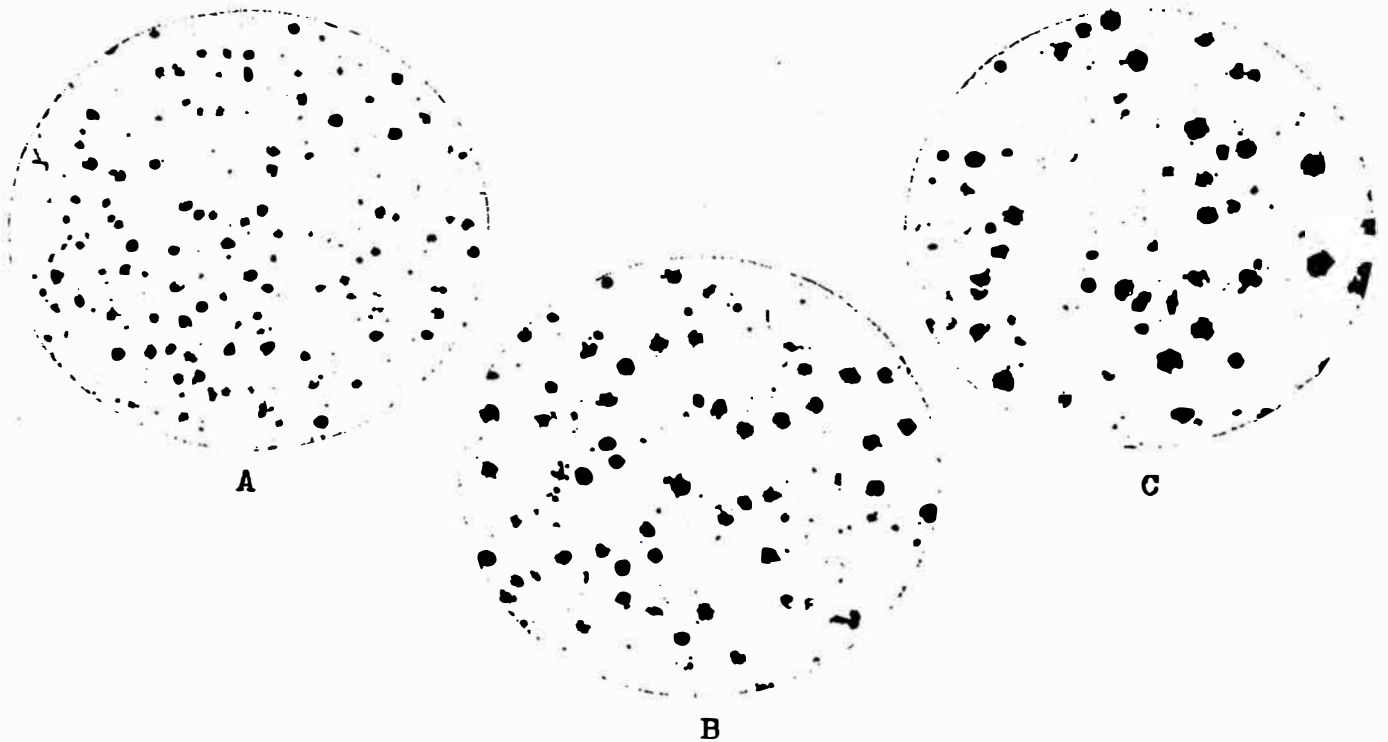


FIGURA 10.7.- Cantidad de nódulos vs. tamaño de sección, sin ataque, a 100 X.

- A.- Sección de  $3/32''$ ; 420,000 nódulos/pulg<sup>2</sup>.
- B.- Sección de  $5/32''$ ; 250,000 nódulos/pulg<sup>2</sup>.
- C.- Sección de  $9/32''$ ; 160,000 nódulos/pulg<sup>2</sup>.

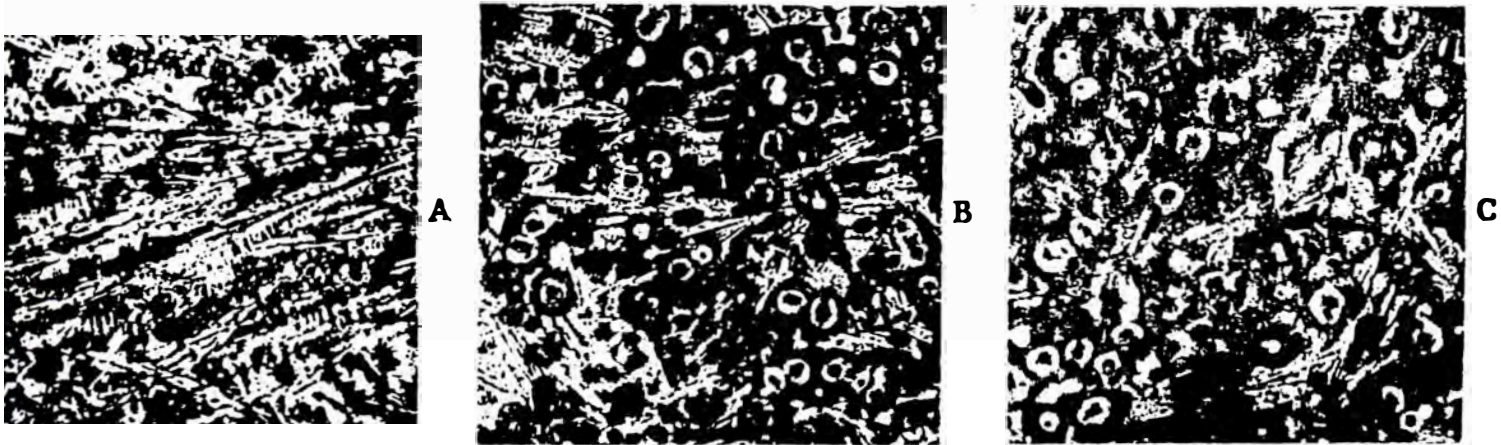


FIGURA 10.8.- Las mismas muestras de la Figura 10.7, atacadas con Nital al 2%, presentando los carburos vs. tamaño de sección. Esta fundición nodular tiene alrededor de 80% de perlita en una sección de  $3/4''$ .

#### 10.4. CONTROL DE LA COMPOSICION DE LA FUNDICION NODULAR EN BRUTO DE COLADA vs TAMAÑO DE SECCION

En la revisión anterior, se ha discutido la influencia profunda que tienen las velocidades de solidificación y enfriamiento, sobre las matrices de la fundición nodular en bruto de colada. El control de la composición es de suprema importancia tanto como para producir la matriz deseada. La influencia de los elementos sobre las propiedades de la fundición nodular, se revisó en profundidad en el Capítulo III.

La fundición nodular en secciones delgadas, para tener una estructura ferrítica en bruto de colada, el baño debe tener una muy alta pureza. Los elementos estabilizadores de carburos deben mantenerse por debajo de los niveles máximos de tolerancia presentados. Para una estructura ferrítica en bruto de colada, aquellos elementos que promueven la perlita, tales como: Mn, P, Cu, Sn, etc., deben mantenerse por debajo de los porcentajes de concentración límite para este grado.

El grupo de elementos que promueven el grafito laminar, tales como: Pb, Ti, etc., intensifican su propensión a bajar los esferoides con el aumento en el espesor de sección y con lentas velocidades de solidificación. Los esferoides parecen deformarse a medida que aumenta los espesores en la pieza en composiciones hipoeutécticas y se incrementa el % de grafito casi laminar. Para la mayor parte, este grupo es de menor importancia que los formadores de carburos y perlita, en piezas de secciones delgadas.

El incremento en la sensibilidad de la sección para que los elementos promuevan el grafito laminar, puede observarse en las Figuras 3.14 y 3.15. Este baño tiene un alto contenido de Pb. Los esferoides son marcadamente destruidos en una sección de 1" y solo influenciados moderadamente en la sección de 3/8".

#### 10.5. PROPIEDADES MECANICAS, EN BRUTO DE COLADA vs TAMAÑO DE SECCION

Las propiedades obtenidas en una barra de ensayo no simulan a aquellas obtenidas en una pieza, a menos que las velocidades de solidificación y enfriamiento sean comparables. Con buenos registros, las propiedades mecánicas, sin embargo, pueden ser aproximadas a partir de la microestructura. La relación ferrita/perlita en la matriz, en gran medida, gobernará las propiedades mecánicas de la estructura en bruto de co



lada. Como previamente se señaló, esta relación es determinada por la composición y también como se enfría el hierro a través de la crítica inferior, el cual esta relacionado a la sustracción de calor de la pieza, a medida que ésta se enfría en el molde.

Como se muestra en la Figura 10.4, los valores de resistencia a la tracción y límite de fluencia disminuyen a medida que el tamaño de la sección aumenta y disminuye la velocidad de enfriamiento. Se emplearon 3 rangos diferentes de análisis, para los datos presentados en este gráfico. El análisis debe ser regulado para diferentes pesos y secciones en la fundición nodular.

La elongación incrementa rápidamente con el aumento en el tamaño de la sección en piezas muy delgadas, a medida que el carburo es "borrado" y que la relación de ferrita a perlita se incrementa. Por encima de 1", la elongación parece que decrece lentamente. La dureza disminuye apreciablemente por las mismas razones.

#### 10.6. PROPIEDADES DE PIEZAS TRATADAS TERMICAMENTE vs TAMAÑO DE SECCION

El recocido u homogenizado en gran manera iguala las propiedades mecánicas de las fundiciones nodulares, a través de un amplio rango de espesores de sección. Las propiedades pueden simular considerablemente aquellas de una barra de ensayo recocida.

Con piezas de secciones muy gruesas, un tratamiento térmico de normalizado resultará en una reducción de resistencia y dureza, siempre a partir de la superficie a medida que la severidad del templeado en el aire y el efecto del perlitizado fino, es disminuido.

#### 10.7. PRODUCCION DE FUNDICION NODULAR DE PAREDES DELGADAS, EN BRUTO DE COLADA

Se ha hecho un genuino progreso, a medida que la tecnología y el arte han avanzado en los E.E.U.U. y en Europa. Se han producido piezas con paredes delgadas libres de carburos y con una matriz esencialmente ferrítica.

Los alemanes han realizado avances significativos en la producción de piezas de paredes delgadas. Además de las técnicas del proceso previamente descritas para el control de la composición, post-inoculación y control del molde, los alemanes atribuyen su éxito al uso de

componentes de la carga de muy alta pureza y a una etapa de pre-inoculación, como se describe a continuación:

El refundido se añade con algo de Sorel metal a la parte inferior de un horno eléctrico de inducción. Esta cantidad cargada asciende a 30% de la capacidad de conservación del horno. El resto del Sorel metal en la carga es gradualmente añadido durante la hornada para mantener la temperatura del metal en justo por encima del punto de fusión. Cuando la carga base se ha añadido totalmente, el baño se sobrecalienta tan rápidamente como sea posible hasta alrededor de 1,510 °C. Podemos asumir que esta etapa se realiza para minimizar el agrandamiento de las células eutécticas.

Luego, el baño es sangrado encima de aproximadamente el 3% del peso del baño de pedazos rotos de Sorel metal F-1 de 1" (4.25% mínimo de C) en la cuchara de tratamiento. Ellos teorizan que tiene lugar una pérdida de núcleos, ocasionados por el efecto de apretar del horno de inducción y los núcleos deben ser reemplazados. El tamaño inusual de células finas de la adición de arrabio, aumenta significativamente la cantidad de células del fierro base cuando son controlados después de la solidificación. El alto C combinado se disuelve fácilmente y el grado F-1 es ideal para este propósito. Se han reportado pérdidas de temperaturas de aproximadamente 44.4 °C.

El tratamiento es realizado por un émbolo profundo con 0.20 %Mg de entrada usando el VL 55 (aleación de FeSi con 31 %Mg). Se emplea una adición de 0.40 %Si para el inicio de la inoculación en secciones de 1/8", adicionado después del tratamiento de eliminación de la escoria. En este momento la temperatura del baño es 1,400 °C.

El baño es post-inoculado con 0.30 %Si añadido a la cuchara de transferencia desde la cuchara de tratamiento a la cuchara de vaciado. Las piezas son vaciadas a aproximadamente 1,370 °C.

La matriz en la sección de 1/8" (2 a 3 mm.) es aproximadamente 60% de ferrita, 40% de perlita y hasta un máximo de 3% de cementita, para un contenido de C total de 3.70% y Si final de 2.80%, Mn por debajo de 0.10%.

Una prominente fundición Suiza produce satisfactoriamente fundición nodular ferrítica en bruto de colada, en secciones delgadas. La

carga consiste de 30% de Sorel metal y 70% de chatarra de acero de dina mo que contiene alrededor de 2.0 %Si, fundido en un horno de inducción de 600 ciclos/seg. Ellos atribuyen su éxito a una post-inoculación con 0.30 %Si a la línea de vaciado. Una fundición nodular libre de carburos es consistentemente producido cuando el tamaño de sección es superior a 10 mm. (alrededor de 3/8").

En los E.E.U.U. sus esfuerzos están dirigidos al mismo objeti vo aún cuando sus caminos han sido algo diferentes. Se ha investigado bastante sobre la composición de inoculantes, el efecto de la composi - ción del metal, la influencia de los elementos gaseosos, etc., usando el ensayo de sensibilidad a la sección, ilustrado en la Figura 10.6. Los moldes para el ensayo se hacen con arena en verde o con almas de CO<sub>2</sub> o almas con aceite. Se ha encontrado una relativamente pequeña dife rencia entre las piezas hechas con arena en verde o con almas, las es - quinas externas, como se esperaba, presentan la mayor concentración de carburos. El uso de este modelo de ensayo se ha adoptado por varias fun diciones progresivamente como un ensayo de control así como para inves tigación.

Para piezas muy delgadas, el ensayo confirma la necesidad de una composición seleccionada. Las técnicas de inoculación son muy sensi bles y es obligatorio el control preciso del proceso de fusión.

Los estudios de la cantidad de células eutécticas en el fie - rro base, confirman los beneficios del pre-acondicionamiento. Una alta cantidad de células eutécticas en el fierro base minimizan la suscepti bilidad para los carburos primarios. Una efectiva desoxidación y desga sificación parece ser necesaria, en vista de que los núcleos que gene - ran las adiciones son de suprema importancia. Los materiales para el pre-acondicionamiento que han demostrado ser los más beneficiosos, son pequeñas adiciones de carburo de Si y/o aleaciones que contienen Ca, ta les como el calcio silicio con 30 %Ca o el preferible, aleación calcio silicio con 15 %Ca.

Se ha encontrado que una adición de 0.05 %Ca a un baño de hor no eléctrico no tratado, reduce significativamente la propensión a los carburos primarios. El Ca aumenta los beneficios de la nucleación en un casi 100% de incremento en el número de células eutécticas en el fierro base, cuando se trata con pequeñas adiciones de aleaciones de Si que

C A P I T U L O   X I .- T R A T A M I E N T O S   T E R M I C O S

Con pocas excepciones, debemos enfatizar que las fundiciones nodulares de calidad pueden producirse recurriendo al tratamiento térmico. Una gran parte de lo publicado anteriormente, evalúa datos en productos hechos a partir de materiales de composición química incierta y con menor pureza que aquellos disponibles hoy en día. El efecto de los elementos subversivos y su control es ahora mucho más comprendido en su totalidad. Los beneficios de la post-inoculación, generalmente han sido aceptados. De este modo, los productores de fundición nodular tienen hoy en día mucho más "herramientas" a su disposición.

Las fundiciones nodulares responden fácilmente al tratamiento térmico. Algunas fundiciones producen 2 o más tipos que pueden encontrarse en un expediente para tratar térmicamente un hierro base. El tratamiento térmico es probablemente necesario en piezas de secciones muy delgadas para descomponer los carburos primarios, a fin de producir una estructura martensítica y para aliviar tensiones en piezas de varias secciones. Generalmente, tenaz ¿por qué se trata térmicamente? Usualmente, el costo se añade al precio de venta. ¿Por qué las piezas tratadas térmicamente se producen en gran volumen?

Pueden emplearse cualquiera de los métodos convencionales de tratamientos térmicos para materiales ferrosos. La fundición nodular posee una matriz semejante al acero, con esferoides de grafito. Parte del C se difundirá reversiblemente desde/al esferoide desde/a la matriz, por un tratamiento térmico controlado. Estructuras ferríticas, ferrítica-perlítica, perlítica y acicular y martensítica, pueden producirse, mientras que el grafito se conserva. Las técnicas del tratamiento térmico, pueden catalogarse como sigue:

- a) Controlando el enfriamiento continuo.
- b) Ajustar la temperatura y mantenerlo a una temperatura dada por un tiempo dado.
- c) Templado.

Los aleantes en la fundición nodular, generalmente se comportan como lo hacen en el acero.

#### 11.1. ENFRIAMIENTO EN EL MOLDE.

Las fundiciones nodulares solidifican con los pequeños esferoides encerrados por la austenita. A medida que la pieza se enfría a

la temperatura eutectoide, la matriz es esencialmente, la composición eutectoide (0.80 %C). Si el enfriamiento posterior es lento, como en las piezas de secciones masivas, la austenita se transforma a ferrita y la mayoría del C que fue disuelto, se precipita y difunde a los esferoides previamente precipitados, agrandándolos. En piezas de secciones livianas con rápido enfriamiento, se inhibe la difusión del C, de este modo la matriz se transforma a perlita (plaquetas de  $Fe_3C$  y ferrita)

De este modo, la estructura en bruto de colada es grandemente determinada por la velocidad de enfriamiento de la pieza, a través de la temperatura crítica inferior donde el fierro se transforma de austenita a perlita o a ferrita más el grafito adicional. La estructura deseada de metal en la pieza, sea ferrítica o perlítica o una combinación de las 2, puede producirse en muchos casos por un control preciso del tiempo de desmoldeo.

## 11.2. ALIVIO DE TENSIONES

El alivio de tensiones de piezas de múltiples secciones sometidas a tensiones internas, minimizará o eliminará las rajaduras o roturas en el servicio. Sin embargo, las fundiciones nodulares son menos sensibles a este respecto que las fundiciones grises.

Se recomienda: 566 °C a 593 °C para análisis regular, 621 °C a 677 °C, una hora por cada pulgada de sección para piezas aleadas o muy intrincadas.

Mantener por 1 hora por pulgada de sección más 1 hora. Enfriar a una velocidad uniforme, preferentemente en el horno hasta casi 382 °C. A temperaturas de alivio de tensiones entre 566 °C y 593 °C, las propiedades serán afectadas solo ligeramente, a mayores temperaturas ocurrirá algo de ablandamiento (de 50 a 70 dureza Brinell) y pérdida de la resistencia a la tracción.

## 11.3. FERRITIZADO SUBCRITICO

Esencialmente, la fundición nodular perlítica puede ser ferritizada por un proceso de recocido subcrítico. Calentar a 649 °C - 704 °C, mantener por 5 horas más 1 hora por cada pulgada de sección. Enfriar uniformemente. Precaución: este tratamiento no descompondrá los carburos primarios.

La Figura 11.1, es un ejemplo típico de la microestructura de una fundición nodular perlítica-ferrítica en bruto de colada, de la siguiente composición:

3.40 - 3.80 %C; 2.20 - 2.40 %Si; 0.25 - 0.50 %Mn



FIGURA 11.1.- Fundición nodular perlítica-ferrítica en bruto de colada, atacada con Nital al 2%, a 100 X.

#### 11.4. DESCOMPOSICION DEL CARBURO

La descomposición de los carburos de fierro es, usualmente rápida, en vista de que los esferoides primarios de grafito están casi siempre ya presentes para actuar como núcleos y debido a que los niveles de C y Si de la mayoría de fundiciones nodulares son, por lo general bastante altos, de este modo apresuran el crecimiento de los esferoides. (Estas son las razones por la que es, usualmente, fácil producir fundición nodular libre de carburos, en bruto de colada, con el apropiado balance químico y la post-inoculación).

Para descomponer los carburos primarios por tratamientos térmicos, las piezas se llevan a 900 °C y mantenida de 1 a 3 horas a esta temperatura. La Figura 11.3, presenta los resultados del recocido de placas de 1/4", no inoculadas y fuertemente carbúrica en bruto de colada, en una serie de temperaturas desde 843 °C a 927 °C.

Estas placas contienen 3.15 %C total, 2.66 %Si, 0.40 %Mn,

0.15 %P, 0.10 %Cu y 0.04 %Mg. En la práctica, en piezas que han sido post-inoculadas durante su manufactura, la mayoría de los que tratan térmicamente han encontrado que los carburos de hierro se descomponen completamente, después de menos tiempo que el indicado en la Figura 11.3. Usualmente, es suficiente una hora a 900 °C.

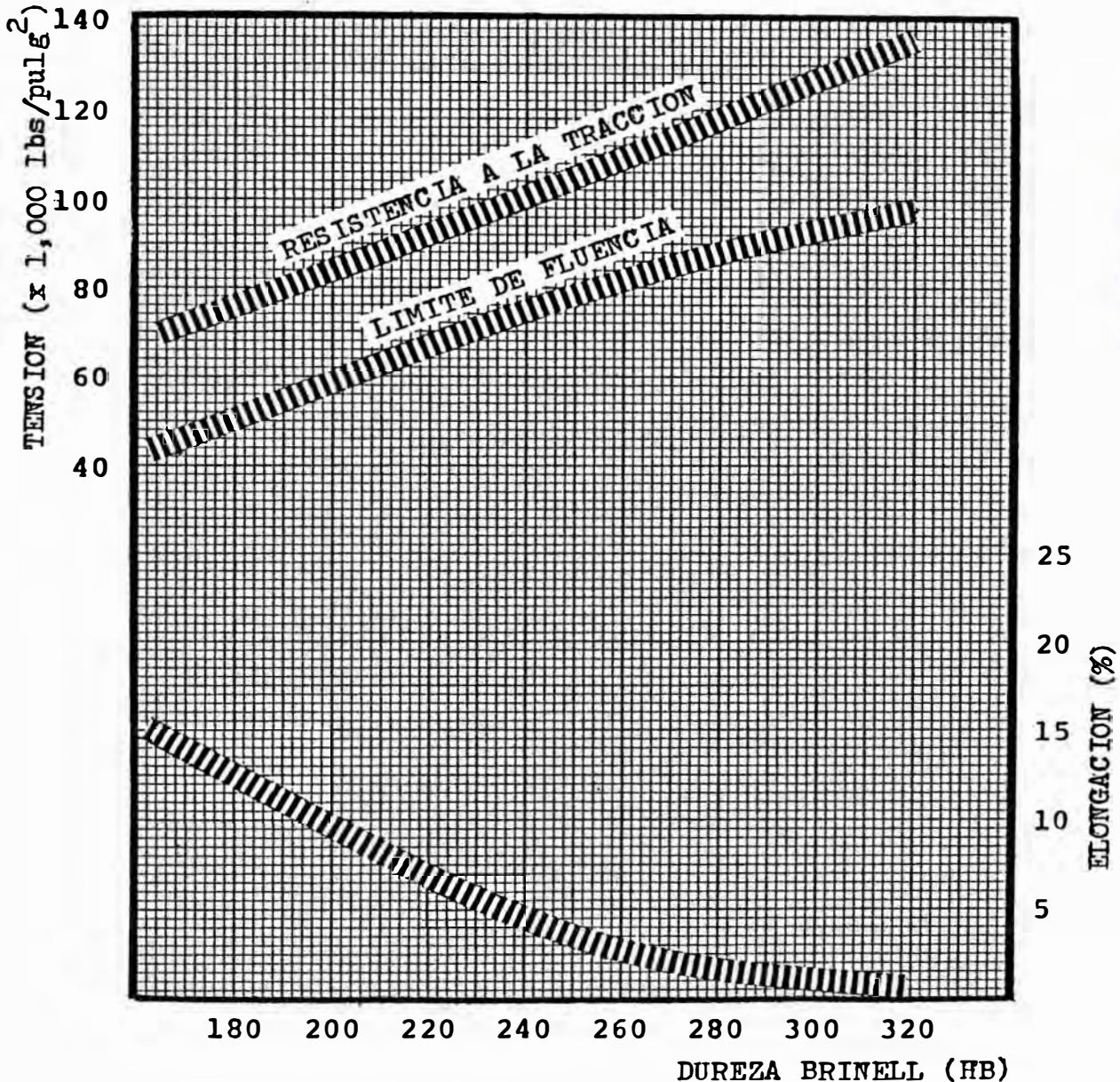


FIGURA 11.2.- Propiedades mecánicas de la fundición nodular ferrítica-perlítica, en bruto de colada.

La primera etapa de recocido a bajas temperaturas, por ejemplo a 802 °C, ha mostrado que ayuda a producir una estructura de ferrita de grano fino a la temperatura ambiente. Las estructuras de grano fi



no son a veces tenaces al impacto y retienen tenacidad a menores temperaturas que las de grano grueso. Sin embargo, la velocidad de descomposición de los carburos a 802 °C cuando están presentes los carburos primarios, es comparativamente muy lenta (puede requerir de 10 a 20 horas a la temperatura indicada) y es más práctico descomponer los carburos a 900 °C, enfriar a la temperatura ambiente, luego re-austenitizar para refinar el grano a 802 °C previamente a la descomposición de la perlita, si se requiere la máxima tenacidad a la temperatura de servicio más baja posible.

La ganancia neta probablemente será de 17 °C a 22 °C por debajo de la temperatura de transición tenaz a frágil.

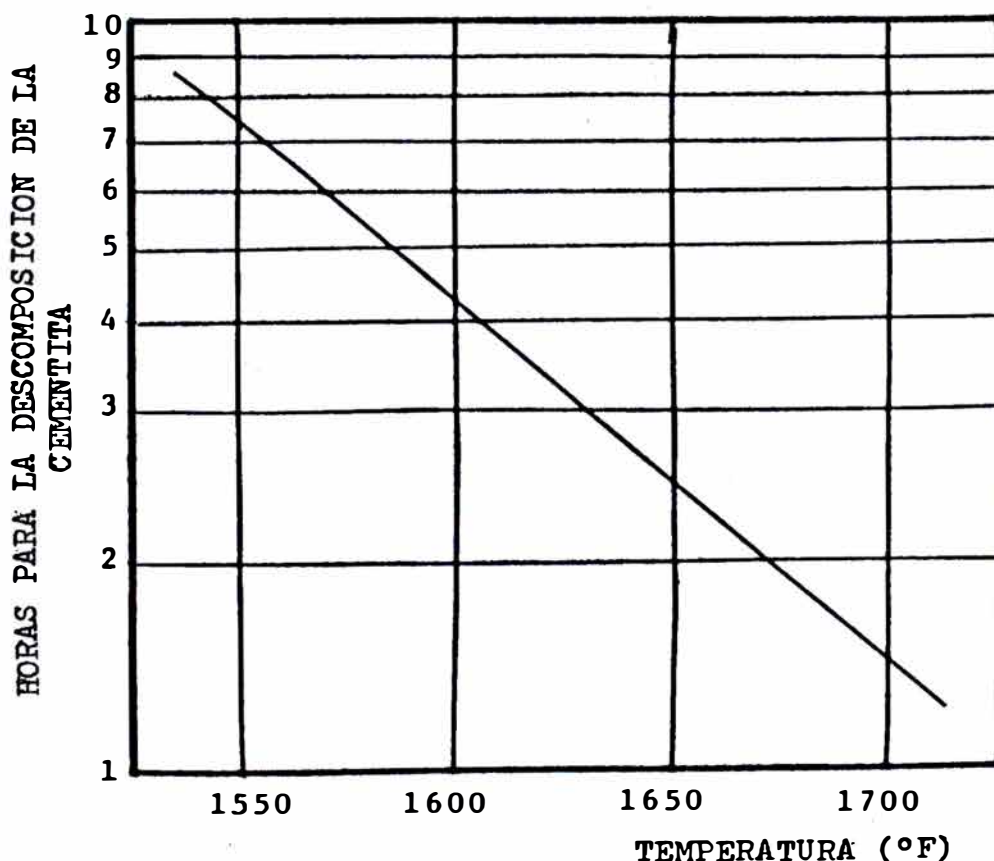


FIGURA 11.3.- Efecto del tiempo sobre la temperatura de descomposición de la cementita primaria.

Según la Figura 11.4, es aparente que disminuyendo el contenido de Si en 0.40%, puede ser una forma más práctica y económica de disminuir esta temperatura de transición en una cantidad igual.

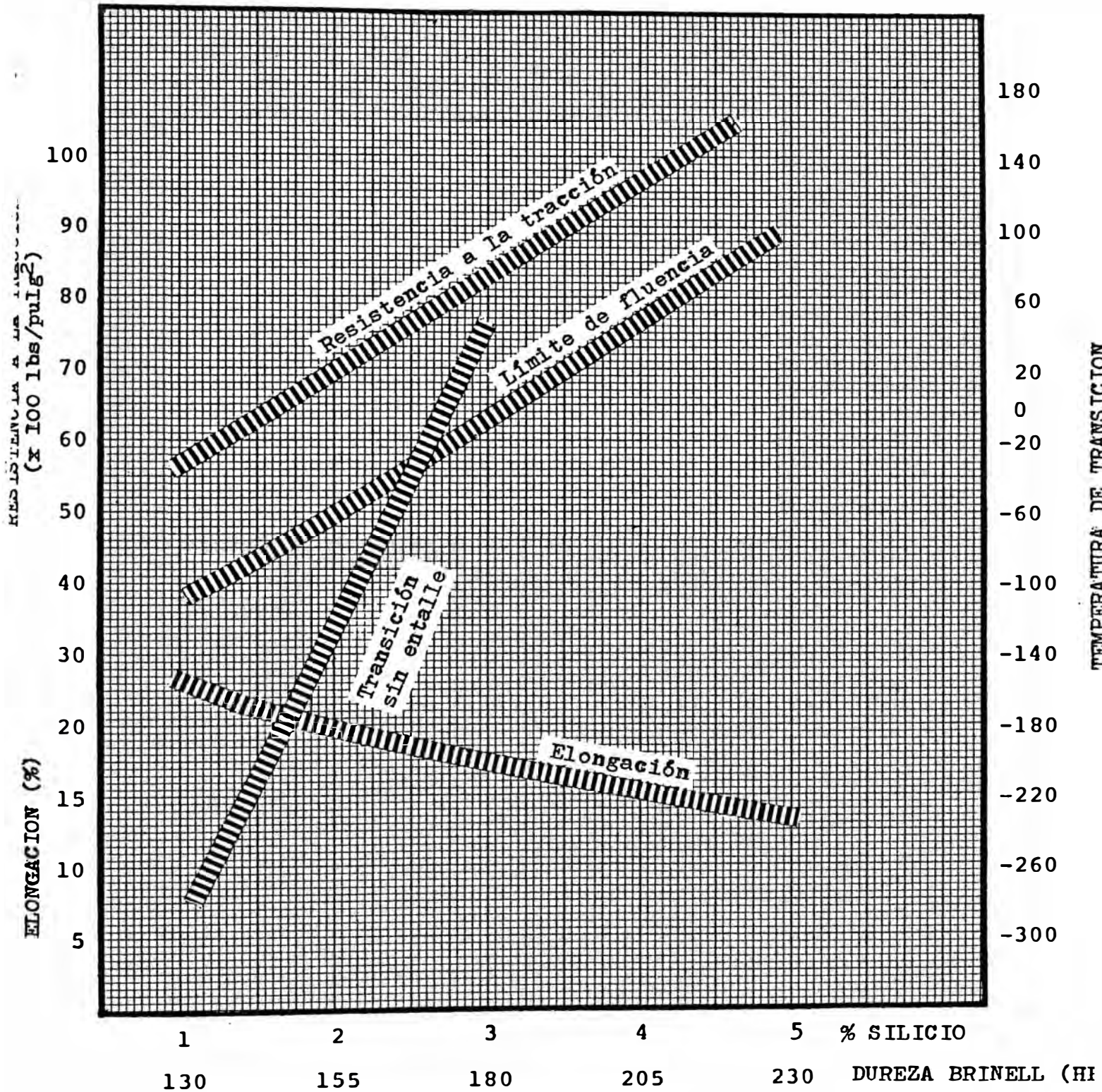


FIGURA II.4.- Influencia del silicio sobre las propiedades mecánicas de la fundición nodular ferrítica.

Ciertos elementos estabilizadores de carburos, el Cr principalmente, forman carburos primarios que son muy difíciles, si no prácticamente imposibles, de descomponer. Por ejemplo, se ha encontrado que 0.26 %Cr produce carburos primarios que no pueden descomponerse después de 2 tratamientos de 20 horas a 927 °C; la estructura resultante después de la descomposición de la perlita, fue una matriz ferrítica-carbúrica con sólo 5% de elongación. Tan poco como 0.05 %Cr, puede doblar el tiempo necesario de recocido para descomponer los carburos. En todos los casos donde se desea un hierro tenaz ferrítico, el Cr residual debe estar limitado a 0.10%, preferentemente mantenerlo por debajo de 0.05%.

Otros estabilizadores de carburos son Mo, en cantidades superiores a 0.3%; el Cu cuando está presente con un porcentaje mayor al 1%; 0.002% o más de boro.

Se conoce ampliamente que la presencia del hidrógeno inhibe y retarda la grafitización en los fierros y la experiencia ha confirmado que esto es demasiado cierto en la fundición nodular.

#### 11.5. DESCOMPOSICION DE LA PERLITA

En las fundiciones nodulares, la perlita se descompone en un rango de 593 °C a 760 °C que es el límite inferior aproximado en el cual ocurre la transición a austenita. Esta temperatura inferior al rango crítico puede calcularse por la siguiente fórmula:

$$\text{Temperatura crítica (°F)} = 1,350 + 50 (\%Si) - 45 (\%Mn)$$

La velocidad de descomposición de la perlita aumenta a medida que se aproxima a la temperatura de transición y disminuye a un valor casi indetectable, a medida que se acerca a 593 °C. El Si es el elemento más importante que influye sobre el rango de temperaturas en el que la perlita se descompone a ferrita.

A causa de la segregación normal de las impurezas y de los aleantes (comunes en los aceros tanto como en los fierros), la perlita presente varía en su estabilidad tanto como en la temperatura a la que se descompondrá más fácilmente. Esto es, especialmente, cierto cuando están presentes más de un elemento estabilizador de la perlita.

En el gran volumen de fundiciones nodulares en el rango de

3.2 - 3.8 %C total, 1.0 - 3.9 %Si, 0.0 - 0.5 %Mn, 0.0 - 3.0 %Ni, 0.025 - 0.08 %Mg, por lo menos el 90% de la perlita será descompuesta si ellos se mantienen por 5 horas a 691 °C seguido a la austenitización.

Algunas veces para una máxima descomposición de la perlita, la temperatura de mantención o de descomposición debe ajustarse teniendo en cuenta la presencia de Si, Ni u otros elementos que elevan o bajan la temperatura de transformación ( $A_1$ ) austenita-perlita, como se muestra a continuación:

TABLA 11.1.- EFECTO DE ELEMENTOS SOBRE  $A_1$

Elemento	Efecto °C/%
Níquel	13.9 - menor
Silicio	27.7 - mayor
Cobre	5.6 - menor
Manganeso	16.7 - menor

En la segunda etapa la temperatura de mantención debe elevarse 13.9 °C si las piezas son enfriadas por debajo de 649 °C, entre la primera etapa de recocido (austenitización y homogenización) y la segunda etapa (descomposición de la perlita) o si se omite la primera etapa de recocido. Esto se debe a que la temperatura de transformación austenita a perlita, en el calentamiento es aproximadamente 13.9 °C por encima de la temperatura de transformación en el enfriamiento.

A veces se ha sugerido que la primera etapa de recocido, o austenitizado, puede ser eliminada si se conoce que los carburos están ausentes de una pieza. Sin embargo, ahora se conoce que un previo austenitizado es necesario si las piezas de fundición nodular ferrítica van a retener su tenacidad a bajas temperaturas. Una pérdida de tanto como la mitad de la resistencia al impacto y una elevación de 27.7 °C en la temperatura de transición, puede ser el resultado de omitir el austenitizado previo.

La ferritización a veces se obtiene por una velocidad de enfriamiento controlada, desde la temperatura de austenitización antes que una parada por varias horas a 691 °C. Debido a que la ferrita comienza a formarse directamente a partir de la austenita desde 802 °C hacia abajo, en fundiciones nodulares de baja aleación, a veces puede usarse un ferritizado por un pequeño ciclo de enfriamiento controlado y

en fierros razonablemente puros, se obtendrá de 90% a 95% de ferrita. La velocidad máxima de enfriamiento sobre el rango crítico para diversas composiciones de fierros, se presenta en la Tabla 11.2.

TABLA 11.2

Composición del Fe, %		Mn	Máxima velocidad de enfriamiento desde 802 a 649 °C, (°C/hr)
Si	Ni		
2.0-2.2	0	0.10	61.1
2.0-2.2	0	0.30	47.2
2.0-2.2	0	0.50	22.2
2.0-2.2	1.0	0.10	38.9
2.0-2.2	1.0	0.30	22.2
2.0-2.2	1.0	0.50	8.3
2.0-2.2	1.5	0.10	22.2
2.0-2.2	1.5	0.30	8.3
2.0-2.2	1.5	0.50	No adaptable al ciclo de enfriamiento controlado.

Nota.- Todos los fierros tienen bajo %Cu y bajo %P.

Altos contenidos de Si (2.4-2.6%) pueden permitir usar ciertas velocidades, altas, de enfriamiento. La ferritización por un ciclo de enfriamiento controlado puede ser económicamente ventajoso en piezas muy grandes o cargas de hornos muy grandes.

Diversos elementos aleantes retardan o previenen la descomposición de la perlita en la fundición nodular. Los más comunes son: P, Cu, Sn, As y Sb.

El P, presente en casi todos los fierros, se segrega en los bordes de grano. Uno de los efectos es estabilizar la perlita en las áreas circunvecinas. Por debajo de 0.10 %P, este efecto no es extremo, para una máxima tenacidad es deseable un %P por debajo de 0.05%. Sin embargo, por encima de 0.10% se vuelve más y más difícil descomponer este borde de grano de la perlita, además de producir la fragilización por el eutéctico intergranular de fosfuro.

El Cu es un potente estabilizador de la perlita, retarda el recocido especialmente en fundiciones nodulares de bajo Si y bajo Ni. Fierros conteniendo 2.5-2.8 %Si, 0.3 %Mn y hasta 1 %Ni, pueden tolerar 0.25 a 0.40 %Cu, con la expectativa que ellos serán recocidos hasta 90% de ferrita; sin embargo, el tiempo de mantención en la segunda etapa, a menudo debe ser doblado. Más Cu, especialmente si también están presen-

tes Mn adicional, Cr o Mo, puede resultar en una fundición nodular perlítica, prácticamente imposible de ferritizar.

Son estabilizadores de perlita muy potentes, pequeñísimas cantidades de Sn, As o Sb.

#### 11.6. INFLUENCIA DE LA MASA EN EL TRATAMIENTO TERMICO

a) EN EL CALENTAMIENTO.- Piezas gruesas o pilas de piezas estrechamente empaquetadas, toman más tiempo para alcanzar la temperatura que las piezas ligeras o piezas apiladas flojamente, en un carro.

Una hora por pulgada de sección de la pieza, o sección equivalente en el caso de pequeñas piezas apiladas, es bastante para llevar el centro de la sección o pila, a la temperatura. A menudo, es suficiente 1/2 hora por pulgada.

La dificultad está en la estimación de la sección equivalente o el tiempo necesario para una pila de piezas. La mejor solución para esto es probar una pieza en el centro del carro y luego cargar el carro de acuerdo al mismo modelo definido cada vez que la pieza es tratada térmicamente.

b) EN EL ENFRIAMIENTO.- La masa es demasiado importante en el enfriamiento. Es obvio que en el molde o enfriamiento en el aire, el centro de una pila o carga se enfriará más lentamente que el exterior. Aún cuando la diferencia sea significativa, en cualquier caso debe determinarse probando una pieza en el centro de la carga o pila.

Esto es, especialmente, importante en tratamientos térmicos de endurecimiento al aire.

#### 11.7. RECOCIDO (FERRITIZADO) (Grados 65-45-12, 60-40-18)

Un recocido total o ablandamiento produce máxima ductilidad y es un tratamiento a 2 temperaturas. En la primera etapa, la pieza se calienta por encima del rango de la temperatura crítica o de transformación a 900 °C, para disolver todos los carburos primarios dentro de la austenita. Mantener 1 hora por pulgada de sección más 1 hora. Recordar que el Mn, Cr, Ni, Mo, o los elementos residuales estabilizadores de

los carburos, retardan la transformación y, a medida que el contenido de Si sea mayor, puede incrementar la temperatura crítica. La homogenización por encima de 900 °C puede aumentar el alabeo, sin embargo, los carburos se descompondrán rápidamente a 955 °C. Las piezas retendrán la resistencia pero requieren un mayor tiempo a 871 °C.

La segunda etapa puede realizarse por cualquiera de los 2 métodos siguientes:

- 1.- Enfriar en el horno a 691 °C, mantener 5 horas más 1 hora por cada pulgada de espesor de sección. Enfriar uniformemente a la temperatura ambiente.
- 2.- Enfriar en el horno a 649 °C con una velocidad máxima controlada de 19.4 °C por hora entre 788 °C a 649 °C. Enfriar uniformemente a la temperatura ambiente.

#### 11.8. NORMALIZADO

En este tratamiento térmico, se usan temperaturas entre 871 °C - 927 °C, para austenitizar y descomponer los carburos. En el caso de piezas relativamente libres de carburos, llevarlas hasta la temperatura y mantenerlas por 2 horas por pulgada de sección. Enfriar al aire para producir el grado perlítico 100-70-03 de fundición nodular. En algunos casos, particularmente cuando están implicadas piezas de secciones gruesas, puede ser necesario enfriar las piezas con ventiladores, a fin de satisfacer los requerimientos de dureza.

**NORMALIZADO ESCALONADO.**- La parte inicial de un tratamiento de normalizado escalonado o en etapas, es igual a la del normalizado. Sin embargo, las piezas son enfriadas en el horno hasta el rango de 788 °C y 746 °C, mantenerlas por 3 horas, luego enfriarlas al aire bajo un suave soplo de aire. Usualmente, este tipo de tratamiento térmico es usado para producir el grado 80-55-06 de fundición nodular, en el cual están presentes la perlita y ferrita.

#### 11.9. NORMALIZADO Y REVENIDO

Donde se requiera óptima tenacidad y resistencia al impacto junto con resistencia a la tracción relativamente alta, se realiza un normalizado seguido de un revenido. Este consiste de un recalentamiento de las piezas a temperaturas entre 427 °C y 649 °C y se mantiene a es -

tas temperaturas por 2 horas por cada pulgada de sección transversal. Estas temperaturas varían dentro del rango anterior, a fin de producir valores de dureza dentro de las especificaciones límites.

#### 11.10. FRAGILIDAD DE REVENIDO

Se ha encontrado que las fundiciones nodulares ferríticas de, normalmente, buena tenacidad pueden ser fragilizadas por el templado de 427 °C - 510 °C. Por fragilidad se entiende una elevación de la temperatura de transición de una fractura tenaz a una fractura frágil, en el impacto.

Comúnmente, las piezas se enfrian al aire después del revenido pero en algunos casos, como en los ciclos de galvanización, son enfriadas muy rápidamente desde este rango de fragilización. La fragilidad aumenta con tiempos más largos a la temperatura de revenido.

Fierros con bajo P (0.05%) y bajo Si (2.0%) soportan una elevación en la temperatura de transición en el impacto, en una magnitud de 11.1 °C a 22.2 °C; fierros con alto P (0.08% a 0.16%) y alto Si (2.7%) soportan una elevación en la temperatura de transición en el impacto, en una magnitud de 55.6 °C a 83.3 °C, cuando son templados desde el rango de fragilización.

#### 11.11. TEMPLADO Y REVENIDO

Estructuras duras, fuertemente acicular y estructuras perlíticas, a menudo, son producidas por templado en aceite, sales o plomo, y luego revenidas. Pueden usarse una gran variedad de tratamientos de templado y revenido, para obtener niveles de alta resistencia y dureza. Por razones prácticas, son más adaptables a los tratamientos de templado, las piezas de tamaño pequeño a mediano.

Como en el normalizado, la finalidad principal es redissolver el carbono en la matriz del hierro y mantener la mayoría de los que hay. Debido a que el templado en aceite, sales o plomo son más severos que el templado en aire, aún fierros de baja aleación pueden templarse para altos niveles de dureza y resistencia. De este modo, ingresa un factor económico en la elección del tratamiento térmico a usar para obtener altos niveles de resistencia.



Usualmente, las piezas pueden templarse y revenirse para un rango más estrecho de dureza que es posible obtener con un normalizado y revenido. Por ejemplo, en piezas templadas y revenidas es usual mantener un rango de valores de durezas de 30 Brinell, mientras que permanecer dentro de un rango de 50 Brinell es considerado razonable, para una pieza normalizada y revenida.

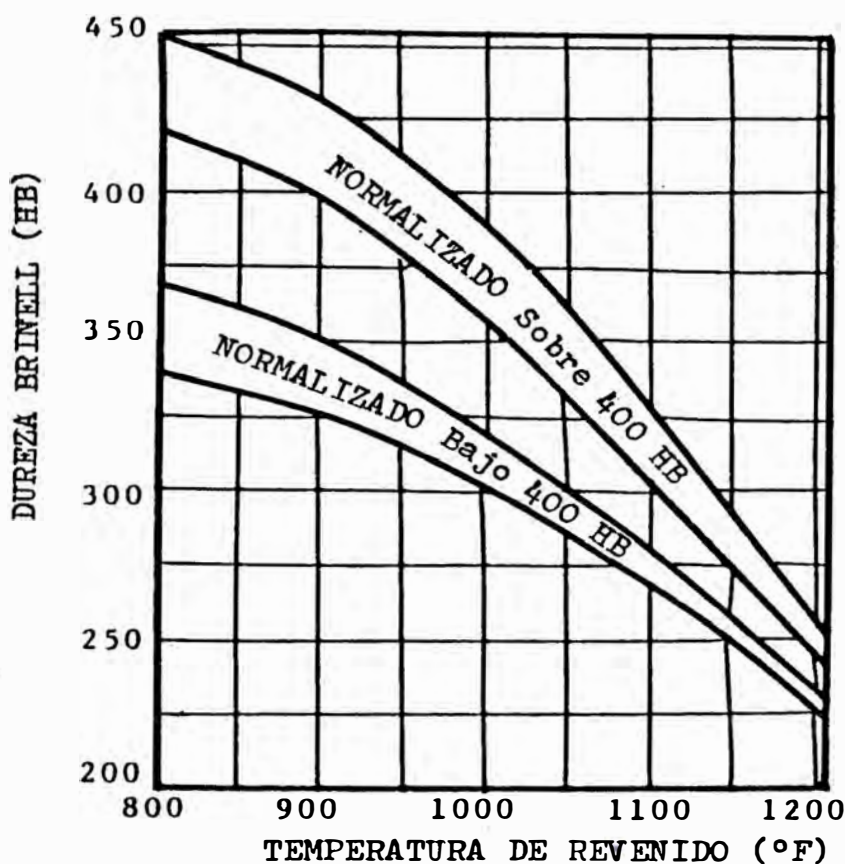


FIGURA 11.5.- Durezas de fundiciones nodulares normalizadas y revenidas, a diversas temperaturas.

Los niveles de dureza en la condición templada son determinados por la temperatura y tiempo de austenitización; el contenido de aleantes del hierro (su templabilidad); la severidad de temple (tipo del medio de temple y el grado de agitación o circulación en el baño); y la masa de la pieza que se está templando.

A 900 °C, una fundición nodular con 2 a 3 %Si estará casi saturada con C y estará en su condición óptima para alcanzar la más alta dureza con el templado. Aún cuando, a menudo se usan menores temperaturas (829 °C - 857 °C) para minimizar las tendencias a las rajaduras y

distorsiones en piezas de forma irregular o complicada. Usando estas bajas temperaturas de austenitización, se obtendrán menores niveles de dureza que el óptimo en la condición templada.

El Ni y Mo tienen efectos muy potentes sobre la templabilidad de la fundición nodular; el Mn tiene un efecto considerable; el Si tiene un efecto relativamente pequeño; y el C total tiene un efecto despreciable. Esto se ilustra en la Figura 11.6, que presenta curvas del Ensayo Jominy para diversas fundiciones nodulares.

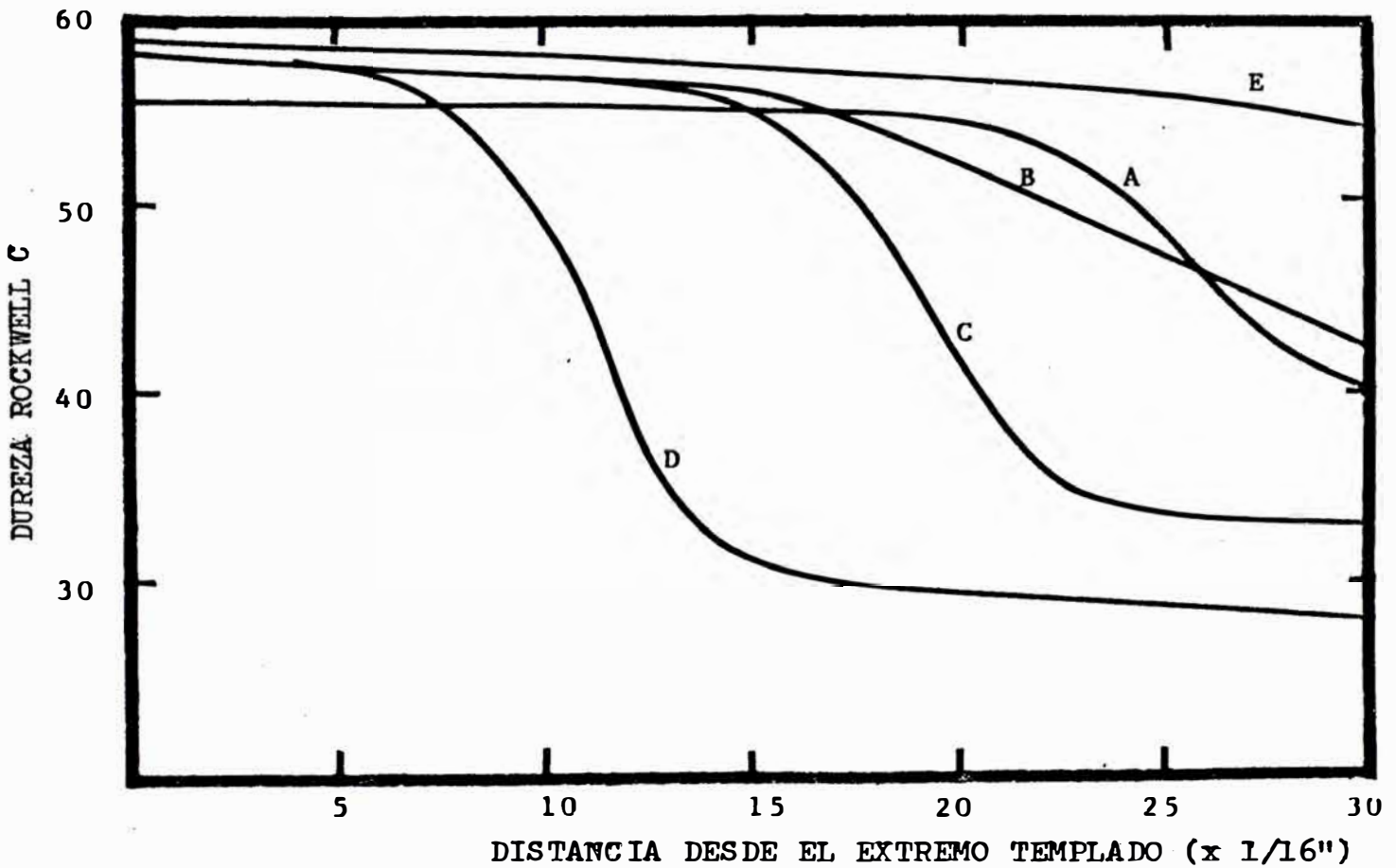


FIGURA 11.6.- Curvas del Ensayo Jominy para diversas fundiciones nodulares.

ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS DE ENSAYO

Muestra	%C	%Si	%Mn	%Ni	%Mo
A	3.27	2.35	0.45	2.56	-
B	3.27	2.38	-	1.02	0.50
C	3.27	2.35	0.03	2.45	-
D	3.58	2.26	0.03	0.99	-
E	3.45	2.56	0.28	3.92	0.57

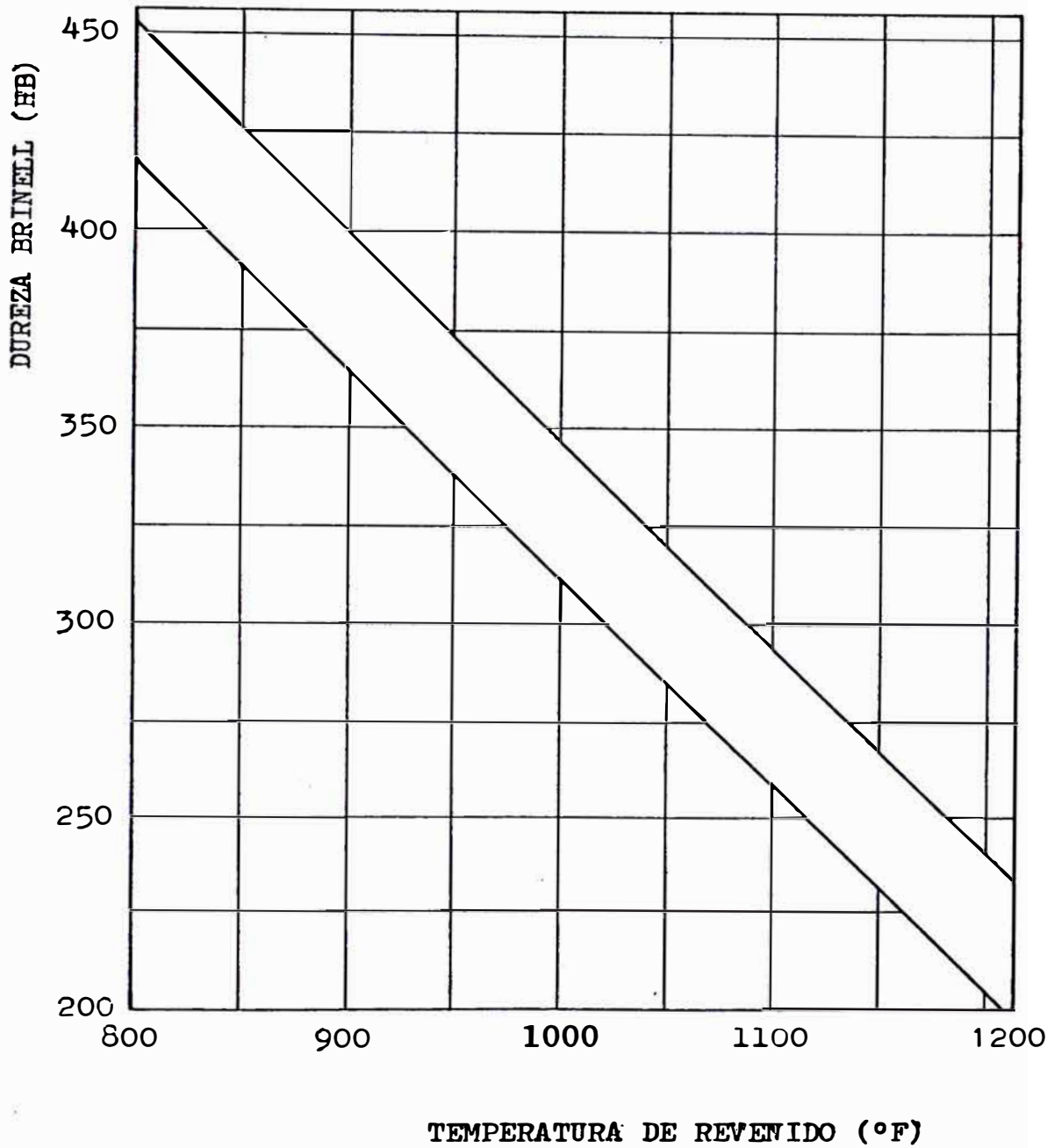


FIGURA 11.7.- Dureza de la fundición nodular templada en aceite y revenida por 1 hora. (En la condición templada, sobre 500 Brinell de dureza)

Los niveles de dureza en la condición templada dependen de la circulación del líquido de templado o agitación de la pieza que se está templando (ver la Tabla 11.3). Un equipo moderno de templado debe incluir un surtidor, impulsor o bomba para tomar ventaja del poder refrigerante del aceite y del endurecimiento de los aleantes. En la Tabla 11.3, el agua sin ninguna circulación o agitación, es considerada como 1.0 para el propósito de comparación.

TABLA 11.3.- COMPARACION DE LA SEVERIDAD DE TEMPLE

Condición	Aire	Aceite	Agua	Salmuera
Sin circulación del líquido o agitación de la pieza	0.02	0.25-0.30	0.9-1.0	2.0
Mediana circulación	-	0.30-0.35	1.0-1.1	2.0-2.2
Moderada circulación	-	0.35-0.40	1.2-1.3	-
Buena circulación	-	0.40-0.50	1.4-1.5	-
Fuerte circulación	-	0.50-0.80	1.6-2.0	-
Violenta circulación	-	0.80-1.10	4.0	5.0

Para evitar las rajaduras debido a los esfuerzos del templado, las piezas deben revenirse inmediatamente después del templado. Niveles de dureza aproximados de fundiciones nodulares templadas en aceite, luego revenidas, se presentan en la Figura 11.7.

Las durezas producidas por el revenido depende del nivel de dureza en la condición templada, contenido de aleantes y tiempo de revenido, tanto como la temperatura. Todavía no se han acumulado suficiente cantidad de datos precisos, para ser capaces de derivar fórmulas o curvas exactas de revenido, tales como aquellas disponibles para los aceros. Una curva promedio, tal como la presentada en la Figura 11.7, deben usarse como una primera aproximación. Con un estrecho control del análisis del fierro y un ciclo de tratamiento térmico, puede esperarse un rango de control más estrecho que aquel presentado en la Figura 11.7 y el que trata térmicamente puede desarrollar una curva de revenido más precisa.

#### 11.12. AUSTEMPERING (Templado en baño de sales y plomo)

Algunas veces, las partes, usualmente bajo 1/2" de espesor, son templadas isotérmicamente a temperaturas en el rango de 260 °C a 538 °C, cuando se desean alta tenacidad y niveles intermedios de dureza y resistencia. Este tipo de ciclo es llamado austempering y produce una

estructura tenaz acicular con niveles de dureza de 20 a 40 Rockwell C (rango de 229 a 375 Brinell). Los riesgos de distorsión y rajaduras son limitados, no solamente debido a que la pieza esta a una temperatura constante, cuando se transforma la austenita a la estructura acicular (que implica un cambio de volumen) sino también debido a la menor contracción total, durante el enfriamiento a causa de la mayor temperatura de templado.

Los mismos factores que son importantes en otros tipos de templado, afectan los niveles de dureza alcanzados por el austempering; temperatura y tiempo de austenitización; temperatura de templado; contenido de aleantes del fierro y la masa de la pieza.

### 11.13. ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL

La fundición nodular puede fácilmente ser endurecida superficialmente por técnicas de inducción o flameado, para obtener durezas superiores a 60 Rockwell C. La pieza resultante tendrá una cubierta o forro duro resistente al desgaste y al mismo tiempo un núcleo que retendrá buena ductilidad y resistencia al impacto.

La existencia de casi 10% en volumen de grafito en la mayoría de las fundiciones nodulares, significa que en el ensayo de dureza, el indentador probablemente descansará sobre algo de grafito, el cual contribuirá en casi nada a la lectura de dureza. Por lo tanto, la matriz de la fundición nodular realmente tendrá una dureza mayor que el indicado en la lectura. Por ejemplo, una fundición nodular de 58 Rockwell C es casi equivalente a una dureza de matriz en el acero de 60 Rockwell C.

a) ENDURECIMIENTO POR INDUCCION.- Trabajos experimentales y aplicaciones exitosas en la producción, muestran que la fundición nodular puede endurecerse superficialmente con calentamiento por inducción, para proporcionar buena dureza en la cubierta con una amplia variación de propiedades, con el núcleo. La operación no es demasiado sensible, y en vista de que la estructura previa y la composición tienen una influencia, la temperatura de endurecimiento puede ajustarse para un exitoso endurecimiento superficial de todas pero sustancialmente estructuras ferríticas.

La selección de una adecuada estructura previa para el endurecimiento superficial por inducción de la fundición nodular, debe ser di

rigida principalmente por las propiedades mecánicas deseadas en el núcleo. Donde se desea ductilidad en el núcleo (representada por el % de elongación) no excederá de 3 a 6%, es adecuada una estructura perlítica en bruto de colada o normalizada, la cual proporciona una inmediata respuesta al endurecimiento por inducción. Cuando se requieren núcleos con ductilidades intermedias (8 - 12% de elongación), se torna importante el hecho que la matriz tenga considerable ferrita, y la temperatura de endurecimiento por inducción puede también incrementarse para proporcionar una adecuada respuesta. Estructuras completamente ferríticas exhiben la máxima ductilidad (18% de elongación o más) y responden muy lentamente al calentamiento por inducción y no son, generalmente, adecuadas para el endurecimiento superficial por inducción. En vista de que las piezas, con frecuencia son predominantemente perlíticas en bruto de colada, estas pueden, a menudo ser exitosamente endurecidas superficialmente por inducción sin un tratamiento térmico preliminar de normalizado, proporcionando al núcleo propiedades tan apropiadas en bruto de colada.

Una temperatura de endurecimiento por inducción de 927 °C, parece ser la más satisfactoria para minimizar la influencia de la estructura previa. Excesivas temperaturas de endurecimiento proveen el riesgo de austenita retenida con una pérdida de dureza, mientras que bajas temperaturas de endurecimiento, a menudo dejan de alcanzar la máxima dureza superficial.

La profundidad del endurecimiento superficial no solamente depende de las variables metalúrgicas tales como: estructura previa, composición y temperatura del endurecimiento, sino también de las características de los aparatos de calentamiento por inducción. La potencia disponible en el convertidor de alta frecuencia y la frecuencia pueden tener una influencia importante. Profundidades mínimas del endurecimiento superficial son producidas con convertidores que operan a alta frecuencia y tengan suficiente potencia disponible para llevar la superficie a la temperatura de endurecimiento en un mínimo de tiempo, para que se minimize la conducción de calor al interior. Esto, a su vez, dependerá del diseño de la espiral de calentamiento por inducción, de la instalación de templado y el uso posible de progresivos endurecimientos superficiales, esto es, calentamiento localizado progresivo y templado.

No hay limitación práctica sobre la máxima profundidad obtenible de endurecimiento superficial, excepto quizás la limitación de la templabilidad en secciones muy grandes. La profundidad mínima práctica de la cubierta endurecida en la fundición nodular, es aproximadamente 0.020" donde se requiera un núcleo con mínima ductilidad, pero será 0.030" - 0.040" donde se requiera un núcleo dúctil ferrítico.

b) ENDURECIMIENTO POR FLAMEADO.- Datos experimentales y la experiencia en el endurecimiento por flameado de la fundición nodular, indican que el material responde bien y tiene excelente resistencia al desgaste. La técnica de endurecimiento es similar a aquella usada con un acero aleado de media templabilidad.

La estructura previa de una pieza que esta siendo endurecida por flameado tiene la misma influencia como en el endurecimiento por inducción. Una estructura completamente perlítica o acicular, en la que la matriz está saturada con C, se endurecerá superficialmente con más facilidad, mientras que una matriz ferrítica requerirá un recorrido de flama más lento para obtener suficiente C en solución para el templado.

Los fierros perlíticos o aciculares responden bien al auto templado y al templado en agua después de la flama. Sin embargo, un fierro esencialmente ferrítico no responderá totalmente a los métodos del auto-templado.

Debe tenerse cuidado en que todo, o sustancialmente todo, los esfuerzos o tensiones internas sean eliminados de las piezas, previamente al endurecimiento por flameado. Si las piezas están en la condición de bruto de colada y son predominantemente perlíticas, ellas deben ser sometidas a una temperatura de alivio de tensiones bastante alta por un tiempo relativamente corto, como por ejemplo, revenido a 593 - 649 °C por 1 hora por pulgada de sección de la pieza. Si esto no se hace en un diseño donde la sección de la pieza esta bajo restricciones, las rajaduras pueden producirse bajo la cubierta endurecida.

Luego del endurecimiento por flameado, si se usa el templado en un medio después del flameado, la pieza debe ser transferida, antes del enfriamiento a la temperatura ambiente, a un alivio de tensiones a baja temperatura a 149 - 204 °C por 1 hora o más, y luego enfriada al aire. Esto sirve para reducir los altos esfuerzos en la interfase entre

la zona endurecida y el metal base a un nivel inofensivo sin una apreciable reducción en la dureza de la cubierta. No es necesario aplicar este alivio de tensiones a materiales endurecidos por el método del auto-templado.

Con una adecuada técnica y un apropiado control de la temperatura de calentamiento (843 - 871 °C), los siguientes rangos de endurecimiento superficial de fundición nodular en producción comercial, pueden ser razonablemente esperados:

- 1.- Fundición nodular, completamente recocida (ferrítica), templada en agua después del flameado, de 35 a 45 Rockwell C.
- 2.- Fundición nodular, parcialmente perlítica pero predominantemente ferrítica, aliviado de tensiones previo al calentamiento de auto templado, de 40 a 45 Rockwell C.
- 3.- Fundición nodular, parcialmente perlítica pero predominantemente ferrítica, aliviado de tensiones previo al calentamiento, templado en agua, de 50 a 55 Rockwell C.
- 4.- Fundición nodular, mayormente perlítica, aliviado de tensiones antes del calentamiento, templado en agua, de 58 a 62 Rockwell C.

Naturalmente, la temperatura y el tiempo de calentamiento, influyen en la cantidad de C disuelto, el tamaño de la sección y la velocidad de templado, son factores que influyen y determinan el valor de dureza final. Se han reportado valores tan altos como 64 Rockwell C, donde el tiempo y la temperatura de calentamiento elevaron el nivel de C disuelto y el templado fue rápido. Esto se compara con la máxima dureza de un acero al carbono templado de 65 Rockwell C si el contenido de C es superior a 0.55%

#### 11.14. TRATAMIENTO TERMICO PARA LAS FUNDICIONES NODULARES AUSTENITICAS

Debido a la estructura austenítica, ningún tratamiento térmico tal como el templado, endurecerá la matriz. Las resistencias pueden ser beneficiadas, sin embargo, en un templado en aceite o agua de 927 a 1,010 °C, algo del C se redisuelve en la austenita, el cual es prevenido de la precipitación, por el rápido enfriamiento. Insignificantes esfuerzos se establecen en el templado. Para piezas de fundición nodular austenítica usadas a elevadas temperaturas, es necesario el alivio de tensiones o preacondicionamiento a una temperatura de aproximadamen-



TABLA 11.4.- EFECTO DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO Y EL TRATAMIENTO TERMICO SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS

Colada	K-1	K-2	K-3	K-4	K-5
% Carbono	3.50	3.50	3.55	3.52	3.32
% Silicio	2.15	2.15	2.01	2.03	1.69
% Azufre	0.021	0.021	0.022	0.021	0.017
% Fósforo	0.020	0.020	0.017	0.019	0.019
% Manganeso	0.25	0.25	0.33	0.26	0.25
% Magnesio	0.066	0.066	0.053	0.048	0.065
% Níquel	Trazas	Trazas	Trazas	1.70	1.50

Bruto de colada (bloques)

Velocidad de enfriamiento	Lento Normal	Muy Lento	Normal	Rápido	Muy Rápido
% Ferrita	40	60	25	10	0
% Perlita	60	40	75	90	100
Grafito	I-4	I-4	I-3	I-4	I-3
Resistencia a la tracción, Kg/mm <sup>2</sup>	47.81	57.58	68.20	79.38	120.93
Límite de fluencia, Kg/mm <sup>2</sup>	35.01	40.78	42.89	54.21	64.54
% Elongación	15.6	15.1	10.2	8.3	5.0
Dureza Brinell	156	197	229	241	285

Recocido (bloques)

% Ferrita	95	95	90	85	70
% Perlita	5	5	10	15	30
Grafito	I-3	I-3	I-3	I-3	I-3
Resistencia a la tracción, Kg/mm <sup>2</sup>	43.87	45.84	47.81	50.62	54.63
Límite de fluencia, Kg/mm <sup>2</sup>	33.19	33.33	34.45	37.97	38.25
% Elongación	-	24.6	23.2	19.1	10.2
Dureza Brinell	146	143	152	163	174

Normalizado (bloques)

% Ferrita	20	25	5
% Perlita	80	75	95
Grafito	I-3	I-4	I-3
Resistencia a la tracción, Kg/mm <sup>2</sup>	67.64	67.43	81.21
Límite de fluencia, Kg/mm <sup>2</sup>	43.24	42.53	42.18
% Elongación	9.9	9.7	6.2
Dureza Brinell	212	207	241

te 70 °C por encima de la temperatura de operación, para evitar alabeos y rajaduras bajo esfuerzos. Este procedimiento se usa en muchas piezas de turbinas de gas y turbo-cargadores.

#### 11.15. CRECIMIENTO

Una estructura perlítica, cuando es recocida a ferrita, crece alrededor de 0.05 pulgadas por pie. En vista de que la contracción de solidificación para el grado perlítico es 0.15 pulgadas por pie, la contracción del modelo se ajusta, generalmente a 0.10 pulgadas por pie para la fundición gris. Las piezas delgadas que solidifican como fundición blanca crecen alrededor de 0.20 pulgadas por pie, cuando son vacíadas bajo moderadas restricciones y recocidas. De este modo, las piezas de fundición nodular recocidas de secciones livianas, son mayores que las dimensiones del modelo.

#### 11.16. EFECTO DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO EN EL MOLDE Y TRATAMIENTOS TERMICOS SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS

El efecto de la velocidad de enfriamiento se ilustra en la Tabla 11.4, con fundiciones nodulares con Ni y sin Ni. Microestructuras del metal, en bruto de colada, se presentan en las Figuras 11.8, 11.9, 11.10 y 11.11. Las estructuras totalmente recocidas, son mostradas en las Figuras 11.12, 11.13, 11.14, 11.15 y 11.16 y las estructuras normalizadas de los mismos fierros, se ilustran en las Figuras 11.17, 11.18 y 11.19. Observar particularmente la influencia del Ni en la estabilización de la perlita.



FIGURA 11.8.- Colada K-1, en bruto de colada, atacada con Nital al 2% a 150 X.



FIGURA 11.9.- Colada K-2, en bruto de colada, atacada con Nital al 2% a 150 X.

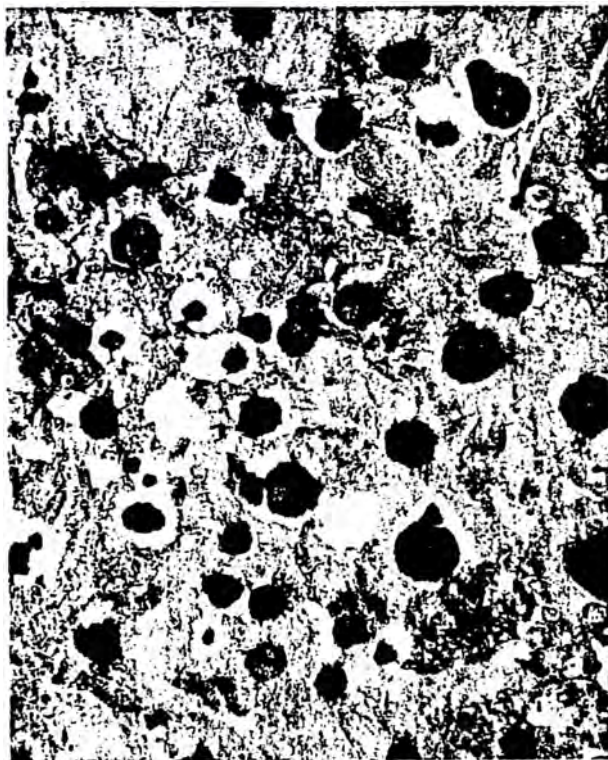


FIGURA 11.10.- Colada K-4, en bruto de colada, atacada con Nital al 2%, a 150 X.

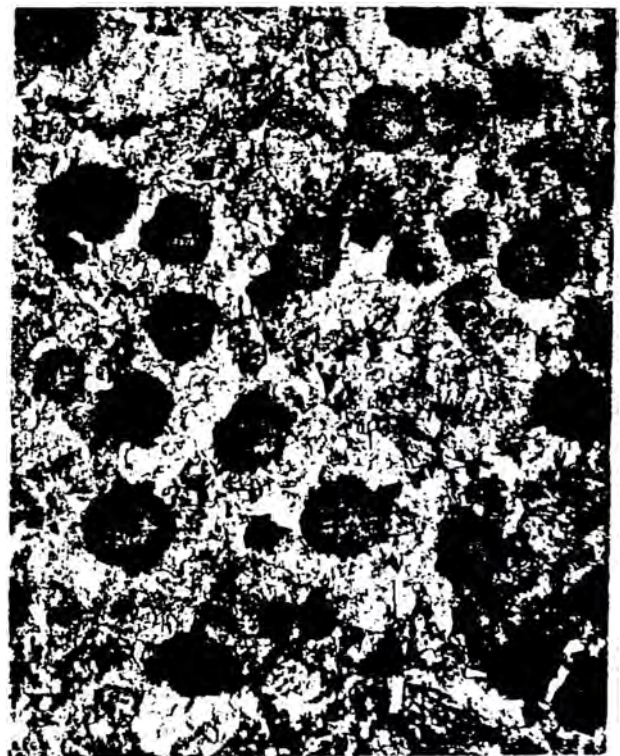


FIGURA 11.11.- Colada K-5, en bruto de colada, atacada con Nital al 2%, a 150 X.

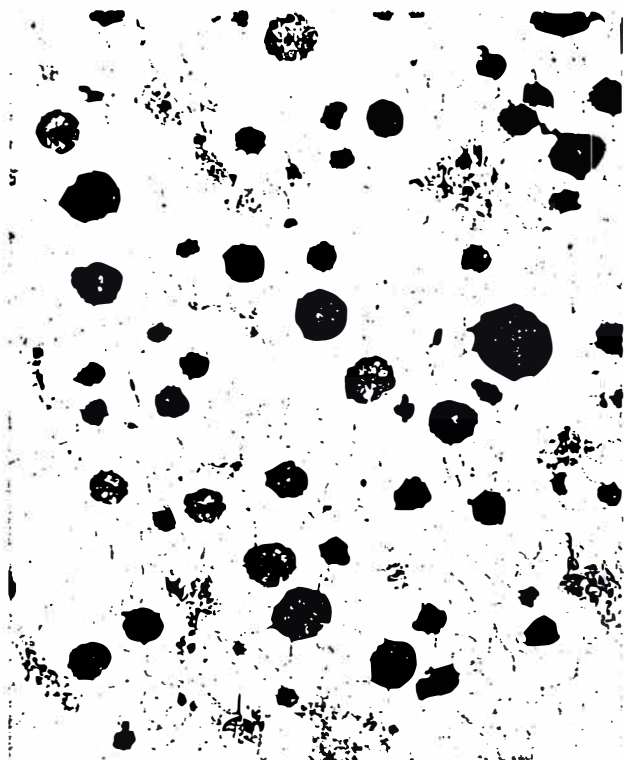


FIGURA 11.12.- Colada K-1, recocida, atacada con Nital al 2%, a 150 X.

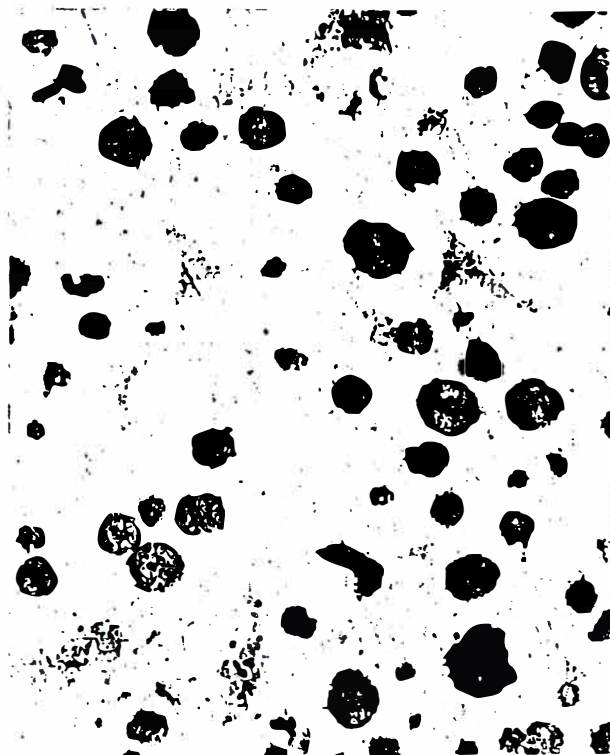


FIGURA 11.13.- Colada K-2, recocida, atacada con Nital al 2%, a 150 X.

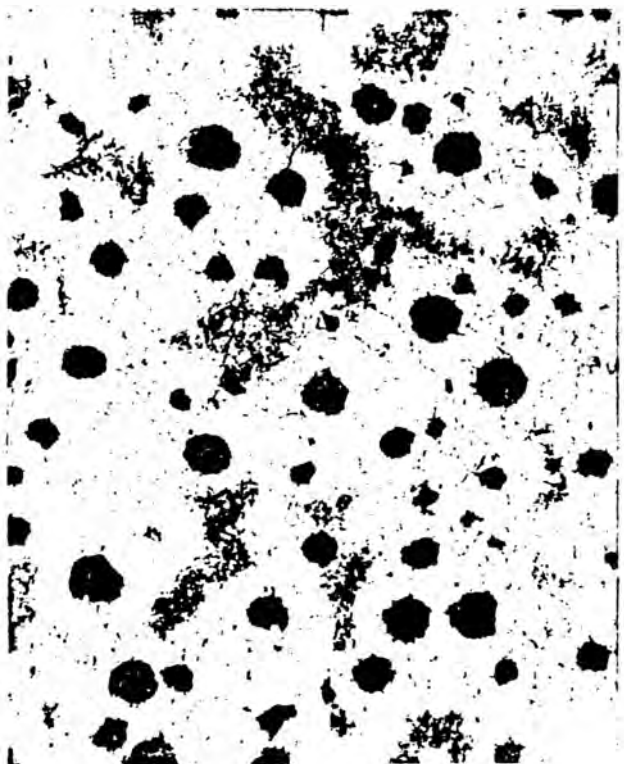


FIGURA 11.14.- Colada K-4, recocida, atacada con Nital al 2%, a 150 X.



FIGURA 11.15.- Colada K-5, recocida, atacada con Nital al 2%, a 150 X.

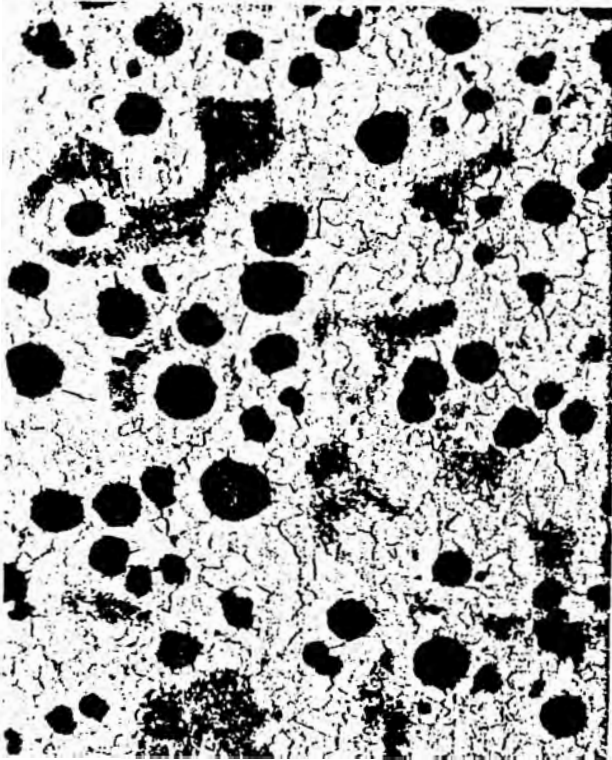


FIGURA 11.16.- Colada K-3, recocida, atacada con Nital al 2%, a 150 X.

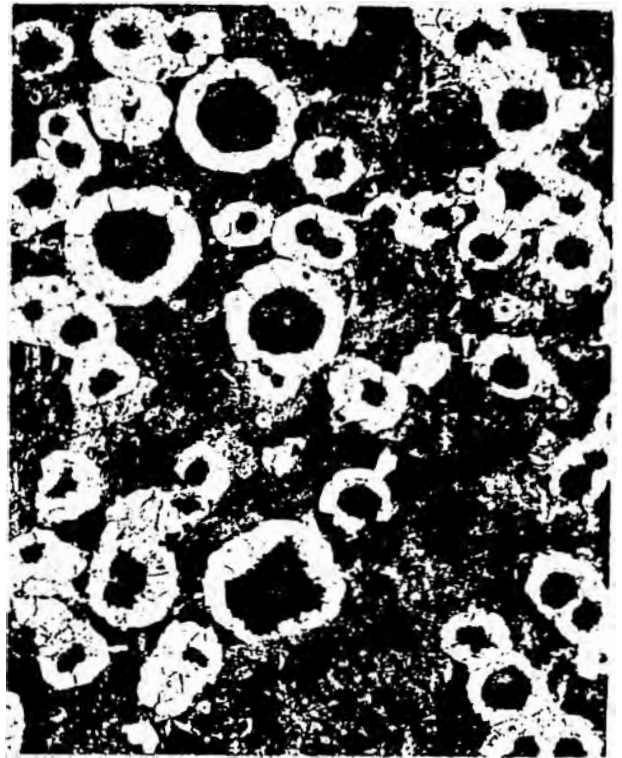


FIGURA 11.17.- Colada K-3, normalizada, atacada con Nital al 2%, a 150 X.

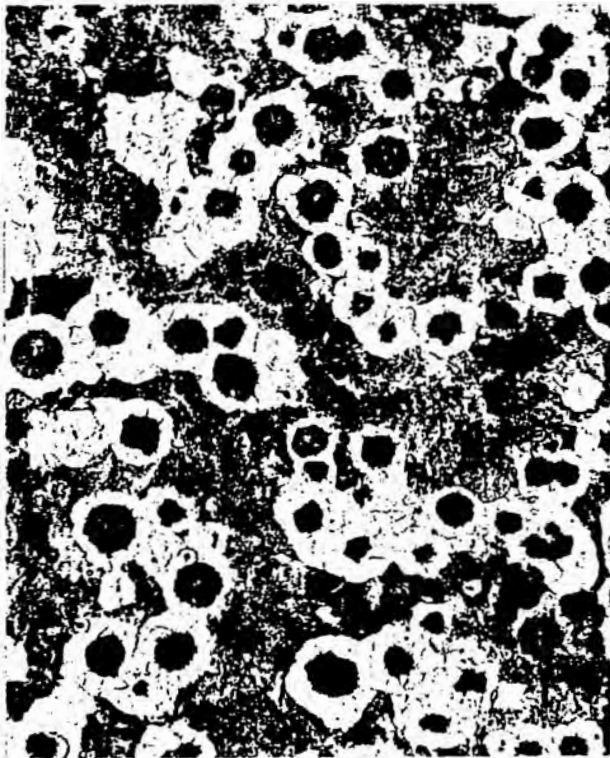


FIGURA 11.18.- Colada K-4, normalizada, atacada con Nital al 2%, a 150 X.

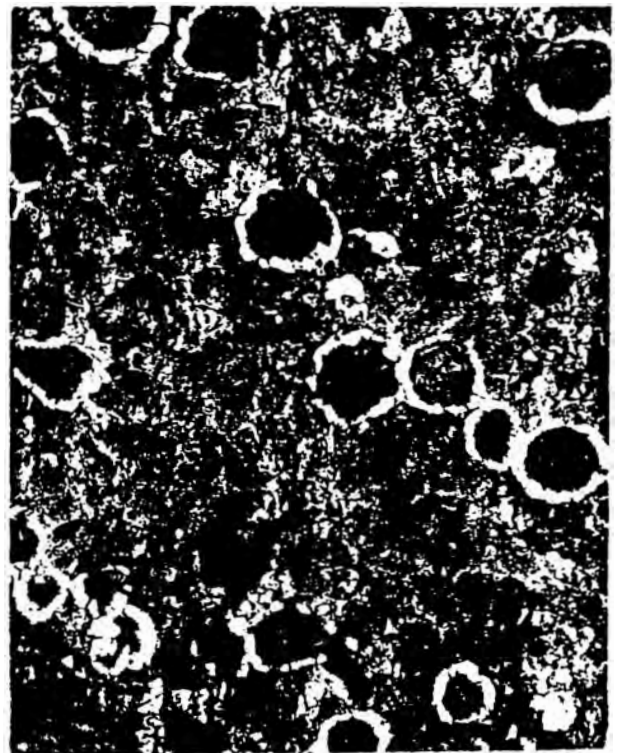


FIGURA 11.19.- Colada K-5, normalizada, atacada con Nital al 2%, a 150 X.

C A P I T U L O    X I I . - D E F E C T O S   E N   L A S   P I E Z A S   F U N D I D A S  
D E   F U N D I C I O N   N O D U L A R

Las piezas fundidas de fundición nodular tienen la mayoría de los tipos de defectos de las piezas fundidas asociadas con las piezas normales de fundición gris. Ellas también tienen una serie de defectos especiales en piezas, peculiares solamente a la fundición gris. Estos se describirán en este capítulo. También, se revisarán las causas y los medios de eliminar o minimizar estos defectos. Las causas de ciertos defectos en piezas de fundición nodular no están completamente claras y en algunos casos existen opiniones diferentes relativas a la causa y al remedio. Donde esto ocurra, se hará un esfuerzo para presentar objetivamente la más reciente información disponible sobre el tema particular involucrado. Hay muchas técnicas diferentes usadas en la producción de fundición nodular. Cada una tiene ciertas limitaciones y ventajas. Ninguna simple técnica tiene una aplicabilidad universal para todos los tipos y tamaños de piezas. Cuando se consideran las causas de los defectos de las piezas fundidas de fundición nodular, todas las diversas ramificaciones y circunstancias que rodean las prácticas de tratamiento del metal, sistema de alimentación y la práctica de moldeo, deben ser estudiadas severamente. A continuación, describiremos cada uno de los defectos más comunes encontrados en las piezas de fundición nodular.

#### 12.1. FLOTACION DEL CARBONO

Cuando se excede el límite de solubilidad del C en la fundición nodular, el exceso de nódulos de grafito flota sobre la "copa" o superficie superior de la pieza. Esto produce la fractura negra presentada en la Figura 12.1.

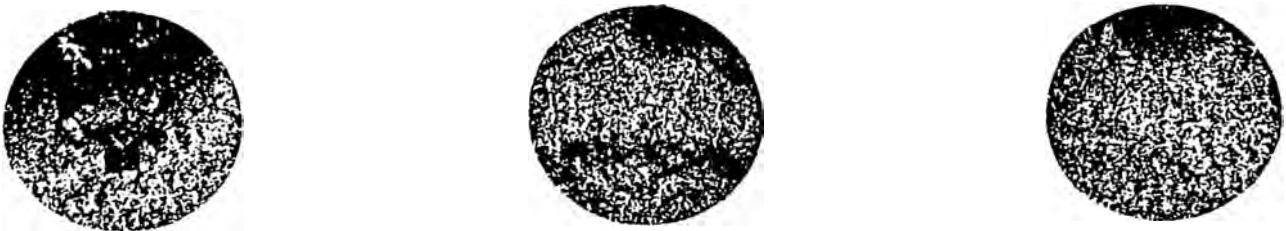


FIGURA 12.1.- Ejemplo de la concentración de grafito, sobre la copa de una pieza fundida.

Las concentraciones de C en las fracturas negras, son a menudo tan altas como 5.0% a 6.0%. Las propiedades mecánicas se deterioran tanto como 50% o más, dependiendo de la cantidad presente de exceso de

C. La Figura 12.2, es un ejemplo de una microestructura en áreas de flotación de C.

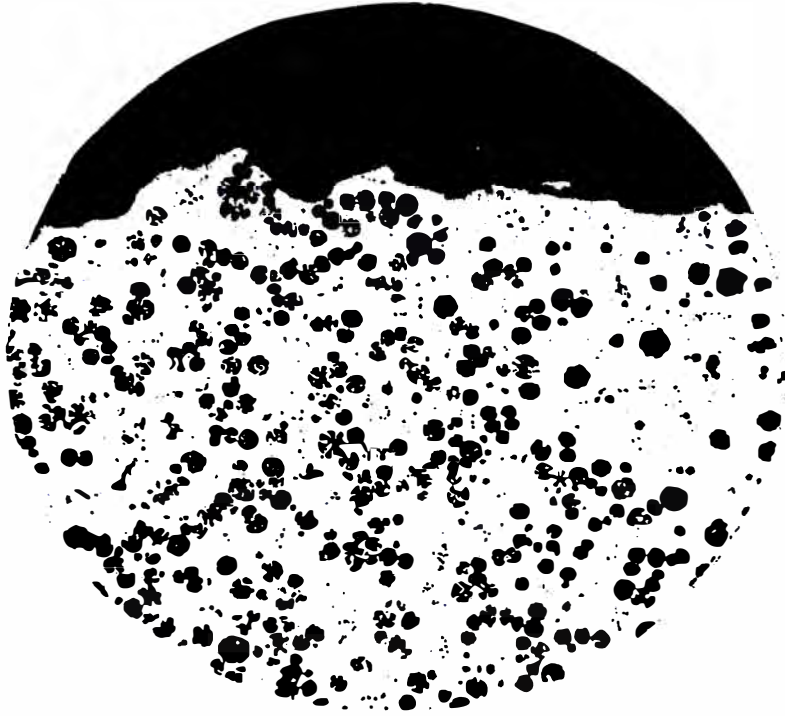


FIGURA 12.2.- Flotación del carbono, sin ataque a 35 X.

Hay 3 factores que son asociados con la ocurrencia del defecto de flotación del carbono en piezas fundidas de fundición nodular:

- 1.- Carbono equivalente.
- 2.- Tamaño de sección de la pieza.
- 3.- Velocidad de solidificación.

Todos estos factores se relacionan a la configuración de la pieza en la interpretación final.

Esencialmente, la fundición nodular es un metal eutéctico. Cuando este existe en una condición de equilibrio con el carbono equivalente en el rango de 4.3, un nódulo de C aparece en cada célula eutéctica, resultando en más o menos igual distribución de los nódulos de grafito presentes. Sin embargo, cuando se produce un hierro hipereutéctico y el carbono equivalente (CE), según la fórmula  $CE = \%C_T + 0.31 \%Si$ , excede aproximadamente a 4.3, el punto eutéctico, el número de nódulos de grafito excede a las células de eutéctico disponibles.



Bajo estas condiciones, suministrando el fierro líquido remanente por un tiempo suficientemente largo, el exceso de nódulos de grafito flotarán a la "copa" o superficie superior de la pieza y aparecerá el problema de la flotación del carbono. Sin embargo, cuando se vacían piezas con secciones delgadas de 1/8" a 3/8", las cuales solidifican rápidamente, puede ser tolerada una fundición nodular hipereutéctica, debido a que el exceso de los nódulos de grafito no tendrán tiempo para flotar hacia la superficie de la pieza. Esta es la razón por la que pueden usarse fundiciones nodulares con carbonos equivalentes, con bastante exceso de 4.3, en piezas de secciones delgadas, para suprimir la formación de carburos.

En el rango promedio de secciones de la pieza (1/2" a 1 1/2"), si el carbono equivalente está por encima de 4.5, siempre aparecerá la flotación del carbono. En piezas de secciones gruesas o en piezas que se enfrían muy lentamente, la flotación del carbono se encuentra en ocasiones cuando el carbono equivalente está por encima de 4.3.

Para el promedio de piezas un carbono equivalente máximo de 4.5, con un máximo preferido de 3.7 %C total, producirá piezas libres de flotación del carbono. Piezas de secciones muy gruesas que solidifican y enfrían lentamente, con secciones mayores de 4", deben tener un carbono equivalente de 4.3 o ligeramente por debajo de este valor.

Las Tablas 12.1, 12.2 y 12.3, contienen las recomendaciones generales para los contenidos de C y Si, en fundiciones nodulares libres de flotación del carbono y carburos no aleados.

## 12.2. GRAFITO EXPLOTADO

Una de las formas más comunes de grafito defectuoso es el llamado grafito explotado. Una microfotografía de esta forma de grafito, se presenta en la Figura 12.3. Los factores, generalmente, responsables para que aparezca el grafito explotado, son los mismos que aquellos asociados con la flotación del carbono. Estos son, valores de carbono equivalente en exceso de 4.5, sobretratamiento con Mg en presencia de metales de tierras raras no combinados en exceso de 0.02% y un tiempo prolongado de solidificación que, a menudo, ocurre en piezas de sección gruesa. En algunos casos, el grafito explotado puede ser el presagio del grafito tipo "chunk", en piezas de sección gruesa.

TABLA 12.1.- RECOMENDACIONES GENERALES PARA LOS CONTENIDOS DE C Y Si, EN FUNDICIONES NODULARES NO ALEADAS

Espesor de pared Mínimo	de pared Máximo	Matriz en bruto de colada			
		Perlítica		Ferrítica	
		%C	%Si	%C	%Si
1/8"	1/8"	4.00	3.75	3.95	4.00
	1/4"	3.70	3.75	3.65	4.00
	1/2"	3.50	3.75	3.35	4.00
	1"	3.05	3.75	3.15	4.00
	2"	3.00	3.75	3.00	4.00
	4" o más	3.00	3.75	2.95	4.00
1/4"	1/4"	3.90	3.25	3.75	3.75
	1/2"	3.70	3.25	3.55	3.75
	1"	3.40	3.25	3.25	3.75
	3"	3.25	3.25	3.05	3.75
	4" o más	3.20	3.25	3.05	3.75
1/2"	1/2"	3.85	2.75	3.70	3.25
	1"	3.55	2.75	3.40	3.25
	3"	3.40	2.75	3.25	3.25
	4" o más	3.35	2.75	3.20	3.25
1"	1"	3.60	2.50	3.50	3.00
	3"	3.45	2.50	3.30	3.00
	4" o más	3.40	2.50	3.25	3.00
2"	2"	3.50	2.10	3.40	2.75
	3"	3.45	2.10	3.35	2.75
	4" o más	3.40	2.10	3.30	2.75
3"	3"	3.60	2.00	3.40	2.50
	4" o más	3.50	2.00	3.40	2.50
4" o más	4" o más	3.55	2.00	3.40	2.45

TABLA 12.2.- CONTENIDO DE C RECOMENDABLE PARA UNA FUNDICION NODULAR NO ALEADA CON 2.5 %Si y MATRIZ PERLITICA

Espesor máximo de pared, en pulg.	%C total
1/8	4.40
1/4	4.10
1/2	3.90
1	3.60
2	3.45
3	3.40
4 o más	3.35

TABLA 12.3.- CONTENIDO DE C RECOMENDABLE PARA UNA FUNDICION NODULAR NO ALEADA CON 2.75 %Si y MATRIZ FERRITICA

Espesor máximo de pared, en pulg.	%C total
1/8	4.35
1/4	4.05
1/2	3.85
1	3.55
2	3.40
3	3.35
4 o más	3.30



FIGURA 12.3.- Ejemplo de grafito explotado, atacada con Nital al 2% a 100 X.

### 12.3. CARBUROS

Este defecto de piezas cubre un rango muy amplio de condiciones que incluyen la presencia de unos pocos carburos diseminados en la matriz, hasta la total ausencia de grafito con una matriz carbúrica.

Los métodos para eliminar o minimizar la presencia de carburos en las piezas fundidas de fundición nodular, son los siguientes:

- 1.- Ajustar la composición química.
- 2.- Cambiar la práctica de inoculación.

3.- Invertir la práctica de fusión.

4.- Determinar si están presentes en las piezas los elementos subversivos formadores de carburos.

a) CARBUROS EN LA LINEA CENTRAL O CHILL INVERSO.- Este defecto ocurre en piezas que solidifican rápidamente y siempre en el área de la pieza que solidifica al último. A menudo, la misma pieza exhibe carburos en otras áreas debido al rápido enfriamiento y a la insuficiente inoculación. La Figura 12.4, es una microfotografía de este defecto. Microensayos por análisis espectrográfico de los carburos de la línea central, han mostrado que estos carburos son relativamente altos en elementos residuales, tales como Cr, Mo, V, Ni, Mn y Cu, cuando son comparados al contenido base de elementos residuales, de una pieza. A menudo, el contenido de elemento residual del área chill en la línea central es de 500% a 700% mayor que el contenido de elementos residuales en el metal base. Este defecto puede ser considerablemente eliminado, por los siguientes pasos:

- 1.- El uso de un fierro base con bajos contenidos de aleantes residuales, que pueden producirse a partir de cargas en el horno con teniendo Sorel metal.
- 2.- El uso de inoculación en el molde (in-mold). Esto implica la adición de 2 a 5 grs. de FeSi de 75%, malla -30, dentro del bebedero o del canal de colada.

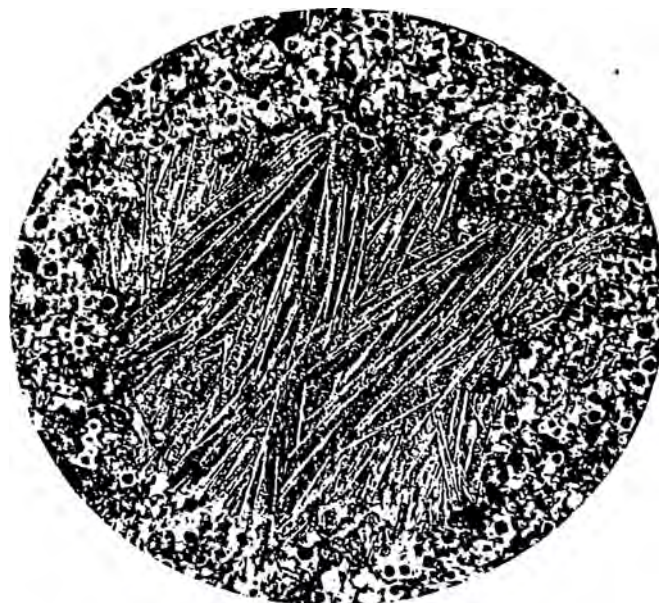


FIGURA 12.4.- Chill inverso, atacada a 100 X.

b) CARBUROS EN EL BORDE DE LAS CELULAS.- Los carburos en el borde de las células, tal como se presentan en la Figura 12.5, usualmente, aparecen en piezas de secciones gruesas que tienen un, relativamente, bajo carbono equivalente y un alto contenido de Mn, Cr y Mo. Estos estabilizadores de carburos tienden a segregarse en la forma de una red de carburos. Esta situación puede minimizarse por la introducción de 1% a 2% de Ni o la eliminación de los estabilizadores de carburos. La inoculación en el molde, también ayudará a eliminar este tipo de formación de carburos.

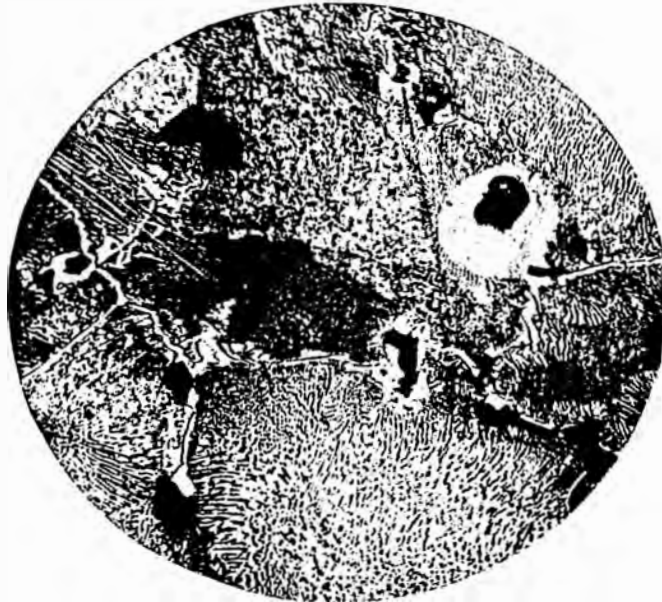


FIGURA 12.5.- Carburos en el borde de las células, atacada con Nital al 2% a 100 X.

#### 12.4. GRAFITO LAMINAR

Aún una cantidad de grafito laminar, relativamente pequeña, puede reducir las propiedades mecánicas de las piezas de fundición nodular y originan que estas sean defectuosas. El grafito laminar y vermicular, tal como se muestran en las Figuras 3.9, 3.10 y 3.11, están generalmente asociados con una cantidad insuficiente de Mg retenido (por lo general menos de 0.03%) o por la presencia de trazas de elementos subversivos. Los posibles métodos de corregir esta situación, son los siguientes:

- 1.- Incrementar el contenido de Mg del fierro, aumentando la cantidad de aleación de Mg o del material de tratamiento usado en la nodulización.
- 2.- Revisar la práctica y el equipo de tratamiento.
- 3.- Revisar las prácticas de fusión y de pre-tratamiento.
- 4.- Determinar si están presentes trazas de elementos subversivos y tomar la acción necesaria, tal como hacer las adiciones de tierras raras.

#### 12.5. FORMACION DE GRAFITO CHUNK

Este defecto siempre se asocia con piezas de secciones gruesas. La Figura 12.6, es un ejemplo típico de grafito chunk.

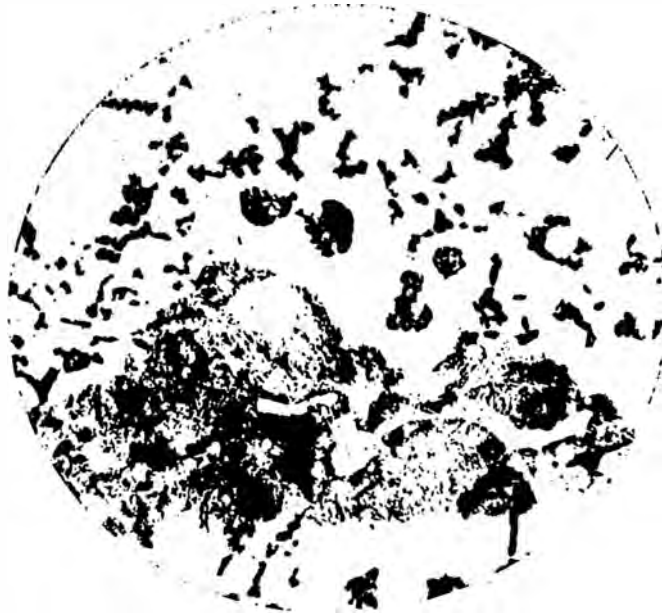


FIGURA 12.6.- Grafito chunk, atacada con Nital al 2% a 100 X.

Un método para minimizar la formación del grafito chunk en piezas de sección gruesa, es la adición de pequeñas cantidades de Sb al fierro, aproximadamente 0.001%.

Este defecto es visible a simple vista en cortes de sierra recientes, a través de piezas de sección gruesa. El mecanismo responsable para la formación del grafito chunk, no ha sido definitivamente establecido. Sin embargo, se cree que éste esté en cierta forma asociado con la velocidad de solidificación y la presencia de elementos subversivos.

Ensayos realizados han mostrado que el grafito chunk aparece en el centro térmico de las piezas. Particularmente, en aquellas piezas en las que la solidificación tiene lugar a una velocidad muy lenta y el gradiente térmico es muy bajo durante la solidificación. Un medio de prevenir la formación del grafito chunk, es el uso de un chill (enfriador) a un lado de la pieza, para empujar el centro térmico de la pieza hacia la superficie y, de este modo, se incrementa el gradiente térmico.

Otros creen que esta situación esta relacionada a una sobre-nucleación. Recientes investigaciones indican que esta situación puede minimizarse reduciendo la cantidad de nódulos en la fundición nodular. Una cantidad de nódulos de 30 a 60 en un bloque de 1" da una indicación de una cantidad de nódulos de grafito, razonablemente, buena que ocurrirá en piezas de sección gruesa.

Una baja cantidad de nódulos puede promoverse por las vías siguientes:

- 1.- Sobrecalentamiento del fierro base por encima de 1,510 °C.
- 2.- Manteniendo el fierro base por un prolongado período de tiempo a temperaturas mayores de 1,482 °C.
- 3.- Inoculación con mínimas cantidades de FeSi (0.1 a 0.25%).

Además, el contenido de Si debe mantenerse entre 2.00% y 1.00%. Aún con lento enfriamiento y con bajo contenido de Si en piezas de sección gruesa, pueden originar alguna formación de carburos. Este problema que ocurre, puede minimizarse disminuyendo el contenido de Mn del fierro base.

Otro método implica el bajo nivel de Mg presente en las áreas donde está presente el grafito chunk. Esta situación, usualmente, se asocia con la pérdida que ocurre durante un período de solidificación de masiado largo. A menudo, puede corregirse esta situación, incrementando el contenido de Mg del fierro.

Este defecto, también se asocia con la presencia de niveles relativamente altos de cerio y otras tierras raras, segregados en las últimas áreas que solidifican en piezas de sección gruesa. Adiciones de 0.001 %Sb o 0.02 %Sn minimizarán la formación del grafito chunk.

## 12.6. INCLUSIONES DE OXIDOS (DROSS)

El "dross" en la fundición nodular es un producto del tratamiento con Mg. Este consiste principalmente de una mezcla de óxido de Mg, silicato de Mg y sulfuro de Mg. En vista de que el Mg está siendo rechazado continuamente por el fierro y se oxida sobre la superficie del metal, probablemente, el dross es el principal defecto encontrado en la producción de piezas de fundición nodular. Este defecto es más predominante en piezas de sección gruesa, sin embargo, puede encontrarse en todos los tipos de piezas de fundición nodular. Ejemplos de dross o inclusiones de óxidos y defectos relacionados con óxidos, se presentan en las Figuras 12.7, 12.8, 12.9, 12.10 y 12.11.

Los defectos por el dross, pueden aparecer como rajaduras. Realmente es un pliegue o unión fría producido por una película delgada de dross, como se muestra en la Figura 12.11. En casos extremos de defectos relacionados con el dross, son visibles arrugas sobre la superficie de las piezas. Esta superficie arrugada, se refiere a menudo como una piel de "elefante". Todas las fundiciones nodulares producidas por la introducción de Mg dentro del fierro, generalmente, tienen algún grado de superficie cuarteada relacionada al dross o uniones frías en la copa o superficie de las piezas. Esto siempre aparece cuando las piezas se someten a la inspección por magnaflux o magnaglow. Estas inclusiones de dross del tipo de pequeñas venillas, pueden volverse en un serio problema en piezas usadas en aplicaciones hidráulicas de alta presión, válvulas de control y bombas, ya que originan fallas debido a la cavitación y erosión.

Es evidente que los defectos relacionados al dross pueden existir en diversos grados y aparece en un número de diferentes maneras. Este defecto puede producirse por diferentes causas, las cuales son:

- 1.- Reteniendo alto contenido de Mg.
- 2.- Vaciando demasiado lento y demasiado frío.
- 3.- Un sistema de alimentación que produzca un flujo de metal turbulento en el molde.
- 4.- Contenidos de Si mayores de 2.70%, tienden a incrementar progresivamente la cantidad de dross presente en el fierro.



5.- Fierros hipereutéticos con alto C y Si, tienden a producir el más pésimo dross.

Para minimizar o eliminar el dross de las piezas de fundición nodular, pueden tomarse los siguientes pasos:

- 1.- Reducir drásticamente la cantidad de Mg usado, sustituyendo los metales de las tierras raras por el uso de la aleación C.S.F. 10, siliciuro de tierras raras o mischmetal.
- 2.- Introducir fundentes de criolita ( $\text{Na}_2\text{AlF}_6$ ) y fluoruro de Na, dentro de las cucharas de vaciado en cantidades de 0.5% a 1.0%. Las cucharas deben escoriarse a fondo antes de que el metal se vacíe dentro de los moldes.
- 3.- Usar sistemas de alimentación que promuevan un flujo de metal tranquilo en los moldes.

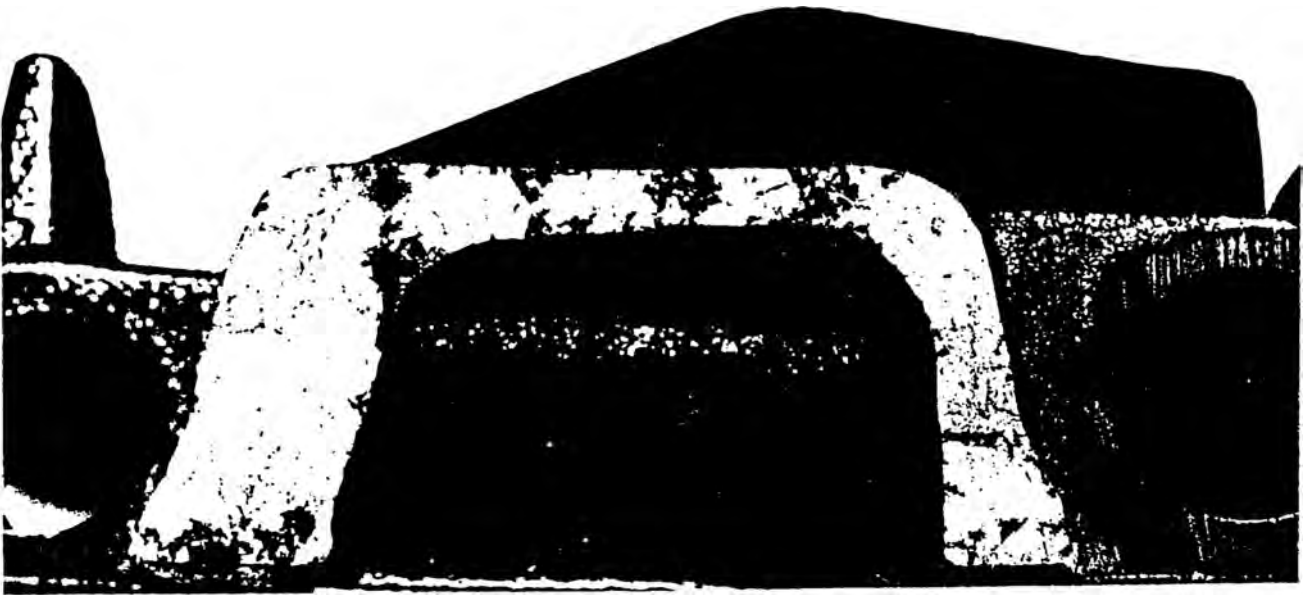


FIGURA 12.7.- Fractura de una pieza que presenta el defecto de dross o inclusiones de óxidos, en la copa.

## 12.7. PINHOLES

La presencia de pinholes en piezas fundidas de fundición gris y fundición nodular, ha sido durante mucho tiempo una fuente de pérdidas significativas de piezas defectuosas en fundiciones comerciales.

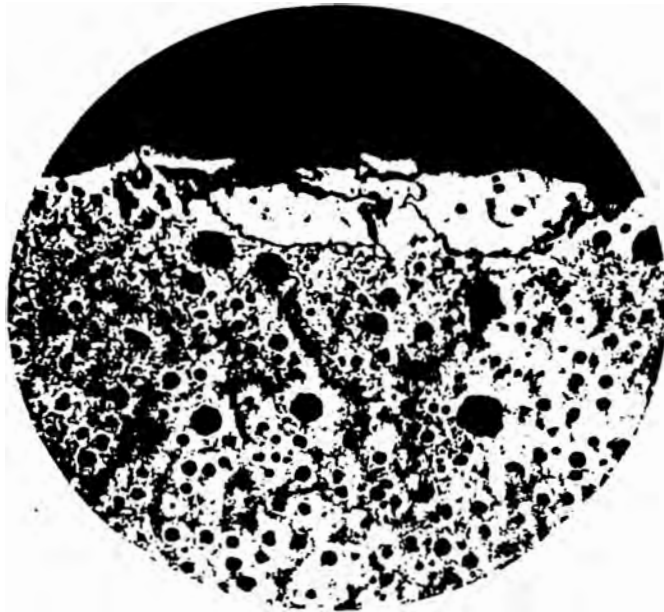


FIGURA 12.8.- Defecto de inclusiones de óxidos o dross, asociado con uniones frías sobre la superficie de la pieza, atacada con Nital al 2% a 35 X.

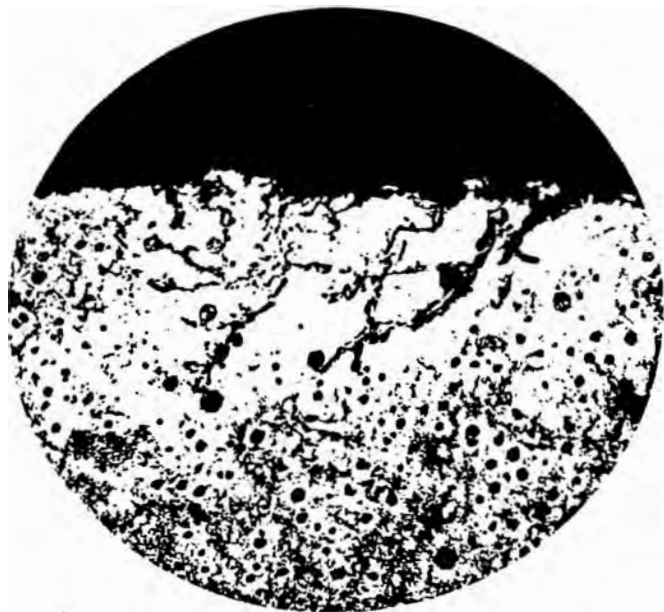


FIGURA 12.9.- Ejemplo del defecto de escoria de silicato de Mg, en la superficie de la pieza, atacada con Nital al 2% a 30 X.



FIGURA 12.10.- Micrografía presentando venillas de escoria y huecos, en la superficie de la pieza y los alrededores del área descarburizada, atacada con Nital al 2% a 100 X.



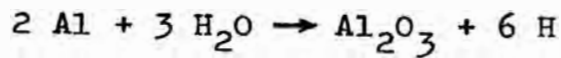
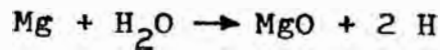
FIGURA 12.11.- Micrografía presentando venillas de escoria de bajo de la superficie de la pieza y los alrededores del área descarburizada, atacada con Nital al 2% a 100 X. Notar los nódulos en las venillas de escoria.

Las pérdidas de piezas por pinholes en la fundición nodular son, aproximadamente 50% mayores que las producidas en la fundición gris. Los pinholes, normalmente, se clasifican de acuerdo al tipo de gas que es considerado como la causa; vapor de Mg, hidrógeno, nitrógeno, monóxido de C y la interacción que involucra al hidrógeno y nitrógeno.

Bajas temperatura de vaciado (por debajo de 1,343 °C) incrementan drásticamente la incidencia de pinholes en piezas de fundición nodular. Las áreas que rodean estos pinholes son, usualmente, perlíticas y a menudo existen trazas de carburos presentes en la matriz. Este tipo de pinhole puede ser asociado con un vaciado frío y la incapacidad de atrapar gases, y la salida o escape del vapor de Mg del hierro fundido. La incidencia de los defectos de pinhole puede minimizarse aumentando la temperatura de vaciado del hierro y por la adición de hasta 0.02% de tierras raras en total, para mejorar la fluidez de la fundición nodular tratada. Incrementando la fluidez se permite que los gases escapen más fácilmente del hierro fundido.

Como regla general, no debe introducirse hidrógeno y nitrógeno dentro del hierro base nodular, en el curso de la fusión. Sin embargo, si estos gases se introducen en la fusión, el tratamiento con Mg los eliminará del hierro fundido. Las fundiciones nodulares normales tratadas con Mg, contienen alrededor de 2 p.p.m. de hidrógeno hasta 80 p.p.m. Cuando este hierro es vaciado dentro de un molde de arena en verde aglomerado con 5% de arcilla, con un contenido de humedad de aproximadamente 3%, solo ocurre una muy ligera incidencia de pinholes de hidrógeno. Sin embargo, si el contenido de humedad de la arena en verde se incrementa a un nivel de 4% a 6%, producirá un defecto muy severo de pinholes. Este aumento del nivel de hidrógeno no solamente provendrá de la arena húmeda, sino puede originarse del refractario húmedo de las cucharas.

La presencia de cantidades incrementadas de potentes formadores de óxidos, tales como el Mg y Al, promueven los pinholes por 2 principales razones. Primero, se incrementa drásticamente la reacción que produce hidrógeno. En vista de que el hidrógeno activamente promueve el crecimiento de la burbuja gaseosa, se producirá un incremento en la severidad de los pinholes, a partir de las siguientes reacciones con vapor en el molde:



Observar, que el aluminio es la fuente más potente de hidrógeno. Por esta razón, deben usarse en la carga materiales que no contengan altos porcentajes de Al. Los óxidos estables resultantes de estas reacciones y la presencia de partículas de silicato de Mg, a menudo actúan como sitios para la nucleación de las burbujas de gas, de este modo se incrementa la severidad de los pinholes de hidrógeno.

La influencia del Al sobre los pinholes en moldes de arena húmedos, se torna muy severa en el rango de 0.045% a 0.060%. Cuando el Al está presente en cantidades que se aproximan a 0.10%, la severidad es mínima.

Los pinholes de hidrógeno son redondeados u oviformes y, usualmente, se presentan justo por debajo de la superficie de la pieza. Estos pinholes de hidrógeno se asocian con arenas húmedas que, a menudo tienen un interior liso cubierto con una capa de grafito cristalino. La microestructura en el área del pinhole, por lo general, consiste de un cerco de ferrita conteniendo grafito vermicular y laminar. Las medidas que pueden tomarse para minimizar la formación de pinholes de hidrógeno, son las siguientes:

- 1.- Aumentar el contenido de sea coal de la arena de moldeo, para llegar a 6% - 8%.
- 2.- Evitar la exposición de la fundición nodular a la humedad, después del tratamiento con Mg.
- 3.- Usar moldes secos.
- 4.- Las altas temperaturas de vaciado y los desfuegos permiten el escape del gas del metal.
- 5.- Adiciones de 2 a 5 gramos de telurio por cada 100 lbs. de fierro tratado.
- 6.- El nivel de Al en el fierro tratado, debe mantenerse por debajo de 0.04%.
- 7.- Las adiciones de los metales de las tierras raras también reaccionarán con el hidrógeno y el nitrógeno, minimizando la formación de pinholes.

8.- La eliminación en la arena de moldeo de los materiales formados de hidrógeno, tales como: cereales aglomerantes y aserrín.

La otra principal fuente de las porosidades por gas en las piezas fundidas de fundición nodular, es el gas nitrógeno proveniente de los aglomerantes en el molde y de las almas que contienen nitrógeno. Estos incluyen los materiales siguientes:

- a) Fenolformaldehido, aglomerante de la alma en cáscara.
- b) Aglomerantes de almas en caja caliente, tipo Foran.
- c) Aglomerantes de moldes y almas, tipo Foran de fraguado al aire.

Los pinholes de nitrógeno en las piezas fundidas de fundición nodular, pueden tomar una forma esférica o irregular. El interior de estos pinholes es, usualmente, de color gris mate. Estos se presentan en el área de la pieza adyacente a la superficie del molde o alma que tienen aglomerantes que contienen nitrógeno, cuando el nivel de nitrógeno en la fundición nodular alcanza 130 p.p.m.

El medio más efectivo para eliminar los pinholes de nitrógeno es emplear aglomerantes en los moldes y almas, libres de nitrógeno. Otro medio es introducir 0.02% de tierras raras o 0.10 %Al. Sin embargo, la introducción de Al origina que la forma nodular del grafito tiende a deteriorarse.

Otra fuente de pinholes, son las burbujas de CO que se forman por la reducción del silicato de Mg y óxidos de la escoria, por el C presente en el fierro o los materiales carbonáceos presentes en la arena. Usualmente, este tipo de pinhole esférico se produce en zonas sobre la superficie superior de la pieza en el área donde las inclusiones de escoria estén presentes. Esto es, por lo general, el resultado del sobretratamiento con aleaciones de FeSi y Mg, originados por fierros base con niveles altos de S y óxidos.

Las adiciones de Te de 2 a 5 gramos por cada 100 lbs. de fierro, ayudan a reducir o eliminar los pinholes.

Las Figuras 12.12 y 12.13, son ejemplos de defectos de pinholes.

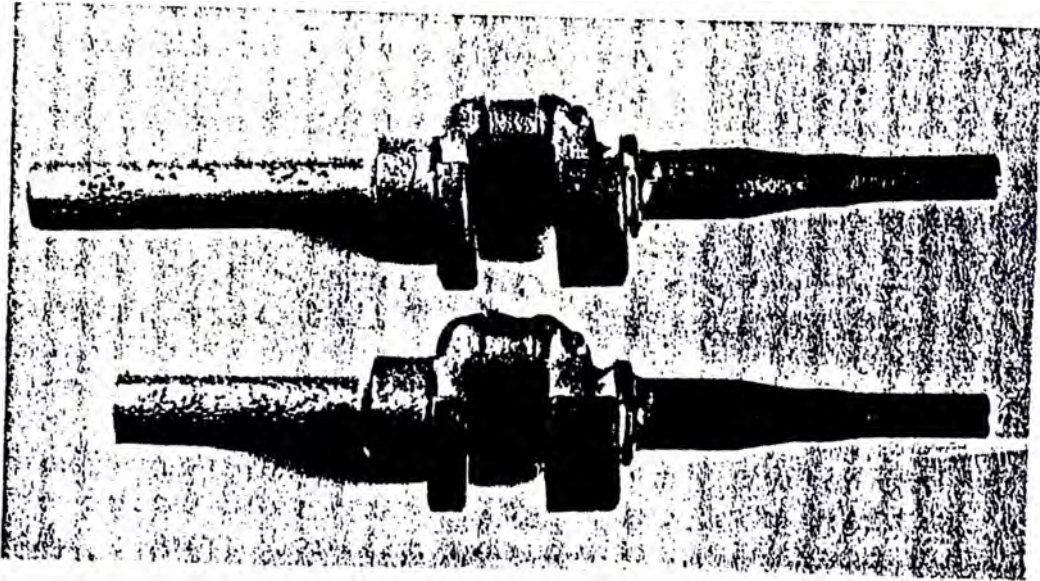


FIGURA 12.12.- Pinholes sobre la parte superior de un cigueñal, producido en fundición nodular.

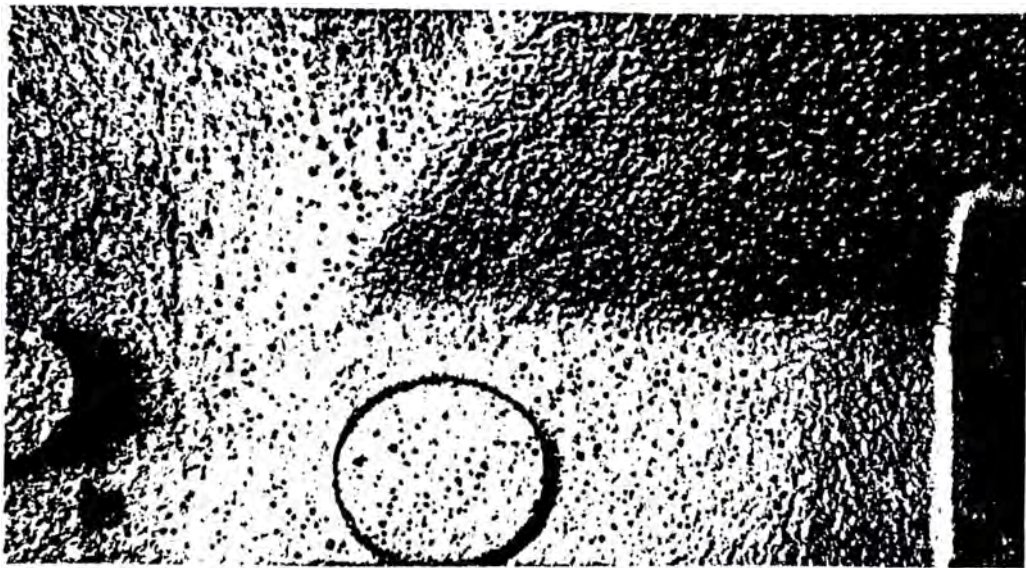


FIGURA 12.13.- Pinholes sobre la parte superior de una carcasa, producida en fundición nodular.

## 12.8. CONTRACCION

La contracción interdendrítica o esponja, ocurre durante las últimas etapas de solidificación y pueden eliminarse cuando se producen adecuadas cantidades de grafito durante la solidificación. Esto es muy importante en las piezas fundidas que tienen áreas que son difíciles de alimentar efectivamente. La Figura 12.14, ilustra la importancia de una apropiada relación de C y Si, que promueve la formación de grafito en

cantidad suficiente. Para determinar un rango seguro de composición química que producirá piezas sanas, se ha establecido la siguiente fórmula:

$$\%C_{\text{total}} + (1/7) \%Si = 3.9$$

Como es evidente, esta fórmula se aparta del carbono equivalente en el rango de alto Si, en vista de que el Si es solamente 1/7 del C tan efectivo como el C, en lugar del 1/3 usado en el cálculo del carbono equivalente. Esto es muy importante en la producción de piezas fundidas de fundición nodular, en moldes de arena secos o moldes apisonados manualmente sin risers. Los rangos de C y Si que hacen posible la utilización de las características de autoalimentación de la fundición nodular, se presentan en la Figura 12.14.

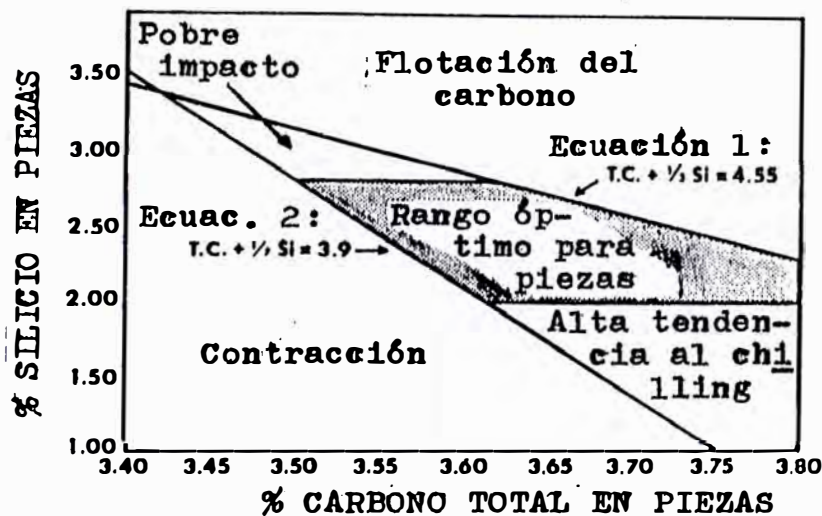


FIGURA 12.14.- Rango de composiciones para piezas fundidas de fundición nodular.

La contracción se incrementará a medida que decrecen las temperaturas de vaciado y es más pronunciada en piezas de sección media y liviana, dependiendo de la relación área superficial al volumen o velocidad de enfriamiento del metal, a medida que se llena el molde. Cuando la temperatura del metal cae por debajo de 1,260 °C, empieza la precipitación del grafito. Si la cavidad del molde no está llena a esta temperatura, se pierde el efecto de un aumento en el volumen debido a la precipitación del grafito y se produce un exceso de contracción. Vaciados muy lentos o sistemas de alimentación que causan un excesivo enfriamiento



to, también originan contracción.

Es importante que se llene la cavidad del molde antes que la temperatura del metal caiga a 1,260 °C y que la distribución del metal sea de tal forma que el gradiente de temperatura este lo más uniforme posible, a fin de que la expansión debido a la precipitación del grafito, pueda ser limitado al molde. Resultados inconsistentes de día a día o aún de una cuchara, puede significar que la temperatura de vaciado es demasiado cerca al límite y debe ser elevada.

Protuberancias aisladas en secciones gruesas pueden haber sido alimentadas o achiladas, de lo contrario ellos actuarán como un riser para la sección liviana, particularmente en arena en verde. A menudo, se eliminará el problema de contracción aumentando la resistencia en caliente y la dureza del apisonado del molde junto con un rápido vaciado y una temperatura del metal de por lo menos 1,427 °C.

#### 12.9. SOBRETATAMIENTO CON MAGNESIO

El sobretratamiento que resulta en las fundiciones nodulares con contenidos de Mg en exceso de 0.06%, es una de las principales fuentes de defectos en las piezas fundidas. Es también una de las más esquivas y mal entendidas causas de defectos de piezas. El rango ideal de Mg es de 0.035% a 0.045%. A continuación, se presenta una revisión de algunos de los principales problemas originados por el sobretratamiento con aleaciones de Mg.

- 1.- El contenido de Mg en exceso de 0.05% tiende a promover la formación de excesivos silicatos de Mg y dross de óxido de Mg o escoria. Además, promueve la formación de la flotación del C.
- 2.- El contenido de Mg en el rango de más de 0.08% produce nódulos de grafito que se vuelven como molinetes o espigas, tal como se presenta en la Figura 12.15. A medida que se incrementa el contenido de Mg, aparece grafito laminar en zonas de extremos agudos.
- 3.- El Mg es un potente estabilizador de carburos, cuando se añade al hierro fundido. Cuando está presente en cantidades en exceso de 0.06%, a menudo, se producen carburos que no pueden ser eliminados por inoculación o por tratamiento térmico.
- 4.- El uso de una cantidad en exceso de Mg, también origina la formación de pinholes que son frecuentemente atribuidos al Al y a o -

tras causas.

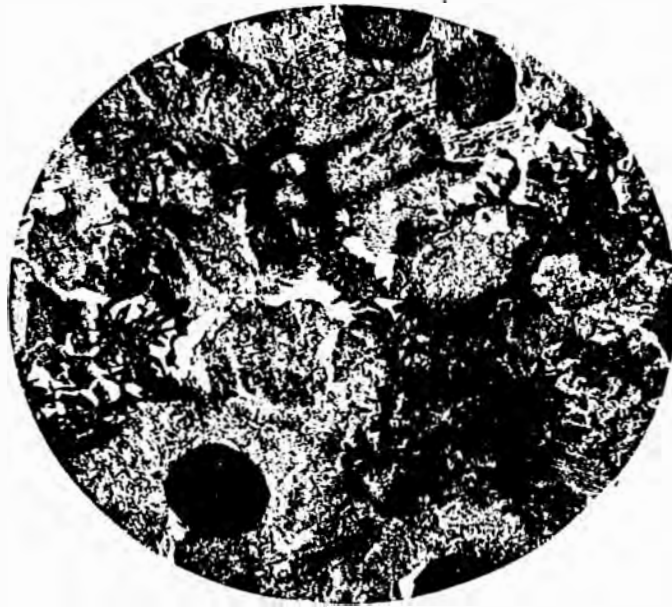


FIGURA 12.15.- Grafito esferoidal y grafito "Crab", producido por sobretreatmento con Mg, muestra atacada con Nital al 2% a 250 X.



FIGURA 12.16.- Grafito "Crab", sin ataque a 1,000 X.

**C A P I T U L O    X I I I   .-   C O N T R O L   D E   C A L I D A D   D E L   P R O C E S O  
D E   L A   F U N D I C I O N   N O D U L A R**

El control del proceso y los procedimientos adecuados de inspección, son una absoluta necesidad en cualquier fundición que produce piezas de fundición nodular. Esto se debe a la naturaleza crítica del proceso y al necesario control exacto en cada etapa. Los programas de control de calidad en las fundiciones que producen piezas de fundición nodular, deben ser cuidadosamente planeados, documentados y seguidos sin desviaciones para mantener una adecuada calidad de la pieza. La producción de fundición nodular, no es un proceso que se autocontrola en el cual la inspección y los procedimientos de control son de valor marginal. Son esenciales los siguientes controles del proceso, que se requieren necesariamente en la producción de piezas fundidas de fundición nodular, de alta calidad.

- 1.- Inspección del material usado en el proceso de fundición nodular.
- 2.- Cargas en el horno.
- 3.- Composición del fierro base.
- 4.- Mantenimiento de la temperatura constante del fierro base.
- 5.- Pesado del metal, una parte del procedimiento de tratamiento.
- 6.- Pesado todas las aleaciones e inoculantes usados en el tratamiento.
- 7.- Un micro-examen de la muestra de cada tratamiento.
- 8.- Análisis químico de la fundición nodular.
- 9.- Requerimientos para el ensayo de tracción.
- 10.- Ensayo de dureza de las piezas fundidas.
- 11.- Inspección visual de las piezas fundidas.
- 12.- Equipos especiales.
- 13.- Un nuevo desarrollo - Determinación eutectométrica de la nodularidad del grafito.

Cada uno de los items ennumerados aquí, se detallarán a continuación:

### 13.1. INSPECCION DEL MATERIAL USADO EN EL PROCESO DE FUNDICION NODULAR

Deben establecerse requerimientos o especificaciones muy definidas para todos los materiales usados en la producción de fundición nodular. Hay que realizar todos los esfuerzos posibles para obtener una chatarra de acero de una composición consistente. En fundiciones donde se producen fundición gris y fundición nodular, debe mantenerse por separado las 2 clases de retorno de los canales de alimentación y alimen-

tadores o risers. El mezclar estos 2 retornos puede conducir a la obtención del fierro base con alto %S y otros serios problemas. Los proveedores de las aleaciones de tratamiento, deben suministrar aleaciones a usarse en el proceso, de composiciones exactas y tamaños adecuados.

### 13.2. CARGAS EN EL HORNO

Todas las cargas del horno deben ser pesadas y cargadas sobre la base de una composición del fierro base calculado previamente, si se va ha producir una fundición nodular de calidad.

### 13.3. COMPOSICION DEL FIERRO BASE

La composición del fierro base usado en la producción de fundición nodular, requiere un control muy cuidadoso del contenido de C, Si y S. Es necesario un análisis rápido del fierro base como una forma de control, para que pueda predeterminarse las cantidades a usar de aleaciones de Mg e inoculantes. El conocimiento del contenido de S, es de particular importancia en la determinación de la cantidad requerida de aleación de Mg para el tratamiento. El S y el C, pueden determinarse por un número de métodos de combustión muy rápidos. El contenido de Si puede determinarse muy rápidamente a partir de los datos de interrupción o parada eutéctica, usados en combinación con los resultados del análisis de C por combustión. Muchas fundiciones que producen grandes tonelajes de fundición nodular, usan análisis espectrográficos al vacío para determinar la composición del fierro base. La composición sobre un amplio rango de elementos, puede determinarse con el espectrómetro al vacío, sin embargo, estos instrumentos son muy caros. El promedio de las fundiciones que producen fundición nodular sobre una base regular, deben tener alguna forma de laboratorio fácilmente capaz de proporcionar un rápido análisis químico del fierro base.

Cuando los resultados del análisis químico se usan como un medio de determinar los ajustes a hacerse en la carga del horno, los datos deben usarse sobre la base de tendencias. No deben hacerse cambios en la carga basándose en los resultados de ensayos individuales. Sin embargo, si un cambio se indica sobre la base de una tendencia o sobre resultados de severos ensayos, deben hacerse ajustes en la composición de la carga.

#### 13.4. MANTENIMIENTO DE LA TEMPERATURA CONSTANTE DEL FIERRO BASE

Es necesario mantener constante las temperaturas del hierro base o las temperaturas de tratamiento, para controlar la consistencia de las propiedades de la fundición nodular. Amplias variaciones en las temperaturas del metal originarán similares variaciones en la recuperación del Mg y en los requerimientos de la aleación de tratamiento. Una de las causas principales de las bajas recuperaciones del Mg, es la alta temperatura de tratamiento. Sin embargo, bajas temperaturas de tratamiento originan recuperaciones de Mg excesivamente altas, que promueven la formación de carburos, pinholes, dross y misruns.

Por estas razones, es absolutamente necesario mantener las temperaturas del hierro base dentro de un rango especificado. Esto puede hacerse en el caso de una fusión en horno eléctrico, en el que se toman lecturas de temperaturas en cada colada, con termocuplas de inserción. En el caso de la fusión en cubilote, pueden usarse pirómetros ópticos que registran continuamente o pueden hacerse a intervalos regulares, observaciones con pirómetros ópticos operados manualmente.

#### 13.5. PESADO DEL METAL, UNA PARTE DEL PROCEDIMIENTO DE TRATAMIENTO

Se producen grandes cantidades de piezas defectuosas de fundición nodular, debido al hecho que no se usan cantidades pesadas de hierro base, en los procedimientos de tratamiento. Esta es una etapa muy importante en la producción de fundición nodular que es, a menudo, pasada por alto con resultados costosos y a veces desastrosos.

#### 13.6. PESAR TODAS LAS ALEACIONES E INOCULANTES EN EL TRATAMIENTO

Todas las aleaciones e inoculantes usados en la producción de fundición nodular, deben pesarse previamente a su uso. El uso de cantidades medidas en lugar del pesado de estos materiales, invariablemente conduce a pérdida del control del proceso y altos porcentajes de piezas chatarreadas.

#### 13.7. MICROEXAMEN DE LAS MUESTRAS DE LOS TRATAMIENTOS INDIVIDUALES

Debe hacerse un rápido micro-examen en el área de tratamiento, para determinar la forma del grafito antes del vaciado dentro de la cavidad del molde de las piezas de fundición nodular. Además, la microes-

estructura de una muestra de ensayo standard, presentada en la Figura 13.1, tomada del último metal vaciado de cada tratamiento, debe ser examinada para determinar si el grafito está aún en la forma nodular.

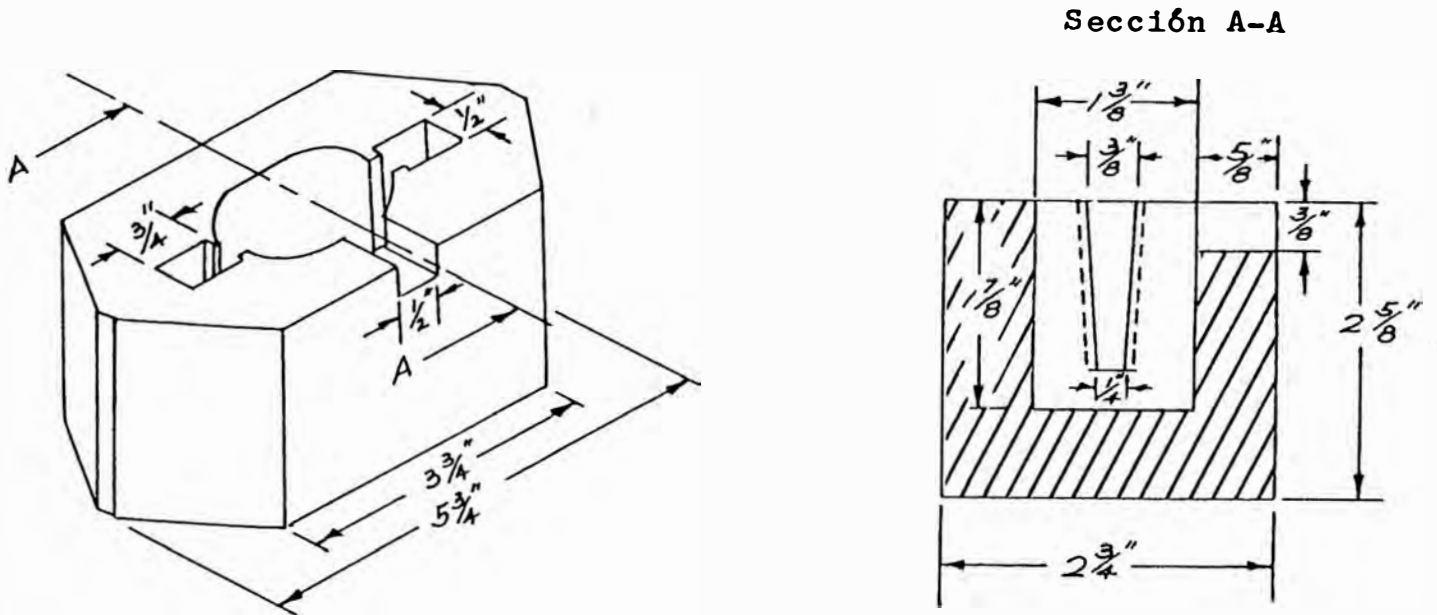


FIGURA 13.1.- Caja de almas para obtener las muestras de fundición nodular, a emplearse en el micro-examen.

Los siguientes párrafos se refieren a la descripción del equipo y a los pasos requeridos para el rápido micro-examen de la fundición nodular, a fin de determinar el grado de nodularidad del grafito.

- a) No se requieren fotografías de calidad de las muestras metalográficas, para propósitos de control. Por lo tanto, los equipos de pulido requeridos, deben consistir de un pequeño banco esmeril con un disco grueso y fino o una desbastadora de cinta y un pulidor de doble disco con 2 cabezales de pulido y control de velocidad. Cada cabezal de pulido debe montarse con 2 lijas de papel. Las lijas de papel que, normalmente, se usan son los grados 0, 00, 000 y 600. El pulido comienza con un pulido grosero con lija de papel 0 y se avanza hasta llegar a la lija 600.

No es necesario un alto grado de pulido, en vista de que la muestra, usualmente, se observa a bajos aumentos. Cuando las micro muestras se obtienen por el corte con cortadoras sin refrigeración con agua, la superficie áspera debe desbastarse sobre un esmeril o una desbastadora. Se recomienda esta práctica para reducir el tiempo de pulido y prolongar la vida de las lijas de papel.

b) Es suficiente un microscopio metalográfico poco costoso, para propósitos de control. El microscopio necesita sólo equiparse con una lente que tenga buena resolución entre 50 a 100 aumentos. Este es un rango suficiente de magnificación para determinar si los nódulos de grafito están bien formados y no haya presencia de grafito laminar.

Debe usarse para este rápido examen una probeta de ensayo A. F.S. para microexamen (ver Figura 13.1). El procedimiento es como sigue:

- 1) Vaciar la muestra con un fierro tratado con Mg e inoculado.
- 2) Después de la solidificación, enfriar la muestra lentamente en agua.
- 3) Romper o cortar la muestra.
- 4) Desbastar la superficie hasta conseguir una superficie plana.
- 5) Pulir progresivamente la muestra.
- 6) Examinar al grafito microscópicamente.

Este procedimiento completo debe tomar alrededor de 1 o 2 minutos. El examen del grafito debe hacerse, si fuera posible antes del vaciado de las piezas.

### 13.8. ANALISIS QUIMICO

Debe hacerse un análisis químico completo sobre muestras seleccionadas de la producción de cada día. Además, hay que efectuar el análisis químico completo en tratamientos discutibles. Si se dispone de equipo espectrográfico, el contenido de Mg del fierro puede ser determinado sobre una base continua para el control en combinación con el micro-examen de la forma del grafito. Los elementos más importantes que influyen sobre las propiedades de la fundición nodular, son los siguientes: carbono, silicio, manganeso, azufre, fósforo, níquel, cobre, cromo y molibdeno

### 13.9. ENSAYO DE TRACCION

Se deben vaciar muestras de bloques o bloques en Y, para el ensayo de tracción. Durante las coladas iniciales, cuando se están estableciendo las prácticas standard en las fundiciones, deben hacerse frecuentemente los ensayos de tracción y del límite de fluencia, a fin de



establecer la práctica standard y correlacionarla con las propiedades mecánicas y las microestructuras. Las probetas de ensayo deben vaciarse de cada cuchara y sacadas de la pieza, si la especificación lo requiere. Si se usa el micro-examen en vez de los ensayos de propiedades mecánicas, las muestras deben mantenerse para chequear su correlación al azar. Los requerimientos para el ensayo de tracción, son los siguientes:

- 1) Las barras de tracción deben maquinarse de bloques en Y de 1" o de bloques vaciados en moldes de arena de almas, ver Figura 2.4. Las barras de tracción maquinadas deben ser de 0.505" de diámetro.
- 2) Las barras de ensayo deben acompañar a la pieza a través de la colada en los procesos de tratamiento.
- 3) Cuando las piezas se usan en la condición de bruto de colada, la correlación de la pieza a las propiedades de la barra de ensayo depende de la relativa velocidad de enfriamiento de las piezas vs. la velocidad de enfriamiento de las barras de ensayo.

Las barras de ensayo pueden sacarse de las piezas para chequear la diferencia. En piezas de sección delgada, cuando ocurre un rápido enfriamiento, se incrementa la dureza y la tendencia hacia la formación de carburos, aumenta las propiedades de tracción y la ductilidad es menor que en los bloques standard en "Y". Sin embargo, si se desean especiales muestras de ensayo, pueden fundirse para simular las propiedades en las secciones específicas.

### 13.10. ENSAYO DE DUREZA

La dureza de las piezas debe ensayarse sobre una base al azar en ubicaciones señaladas. La dureza de las piezas fundidas debe caer dentro de los rangos especificados, esta puede correlacionarse con la resistencia a la tracción, usando un factor K.

Un método de chequear la calidad de la fundición nodular, es calculando la relación de la resistencia a la tracción a la dureza Brinell. El factor K, se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{Factor K} = \frac{\text{Resistencia a la tracción (lbs/pulg}^2\text{)}}{\text{Dureza Brinell}}$$

Ejemplo:

$$\text{Factor K} = \frac{86,000 \text{ lbs/pulg}^2}{200} = 430$$

Generalmente, en una fundición nodular de buena calidad, el valor obtenido del factor K es de, aproximadamente, 435 más o menos 15, para las fundiciones nodulares que están en la condición de bruto de colada o grados recocidos. Para los grados normalizados un valor típico del factor K es de alrededor de 470 a 480.

Las variaciones de estos ratios pueden provenir de un número de diferentes fuentes. Algunas de estas son: carburos masivos, grafito vermicular, grafito laminar, flotación del C, muestras de ensayo no sólidas y resultados incorrectos de resistencia a la tracción o malas lecturas de la dureza Brinell.

### 13.11. INSPECCION VISUAL

Las piezas deben inspeccionarse de rajaduras, quemado en arena, uniones frías, rechupes o contracciones, sopladuras, etc. Es aconsejable examinar las fracturas a medida que se eliminan los canales de alimentación.

### 13.12. EQUIPOS ESPECIALES

En la actualidad, a medida que las aplicaciones de las piezas de fundición nodular se tornan más sofisticadas, los requerimientos de calidad se han vuelto más precisos, por lo que han entrado en uso tipos especiales de equipos de inspección. Algunos de los tipos de equipos usados más ampliamente, son los siguientes:

- 1) EQUIPO DE RAYOS X.- Para determinar si están presentes defectos internos en las piezas fundidas.
- 2) EQUIPO DE MAGNAFLUX Y MAGNAGLOW.- Para encontrar defectos superficiales en las piezas.
- 3) EQUIPO DE INSPECCION SONICA Y ULTRASONICA.- Para la determinación del % de grafito nodular presente en las piezas individualmente y la presencia de defectos internos. Este tipo de equipo de inspección puede ser automatizado y usado sobre una base de alta producción.

### 13.13. DETERMINACION EUTECTOMETRICA DE LA NODULARIDAD DEL GRAFITO

Recientemente en los E.E.U.U. y en Europa, se ha desarrollado un nuevo método para determinar el grado de nodularidad del grafito. Es

to implica la interpretación eutectométrica de las curvas de enfriamiento de la fundición nodular. Las fundiciones nodulares hipereutéticas tratadas con Mg, presentan una cúpula semejante a la interrupción en la curva de enfriamiento. A medida que esta interrupción en forma de cúpula desaparece, el grado de nodularidad del grafito declina. La principal dificultad con este procedimiento de ensayo, es el hecho de que las prácticas de tratamiento e inoculación, varían de una fundición a otra. Como resultado de ello, se requiere para cada fundición y práctica de tratamiento, un juego de curvas de enfriamiento de control. Ejemplos de estas curvas, se presentan en la Figura 13.2.

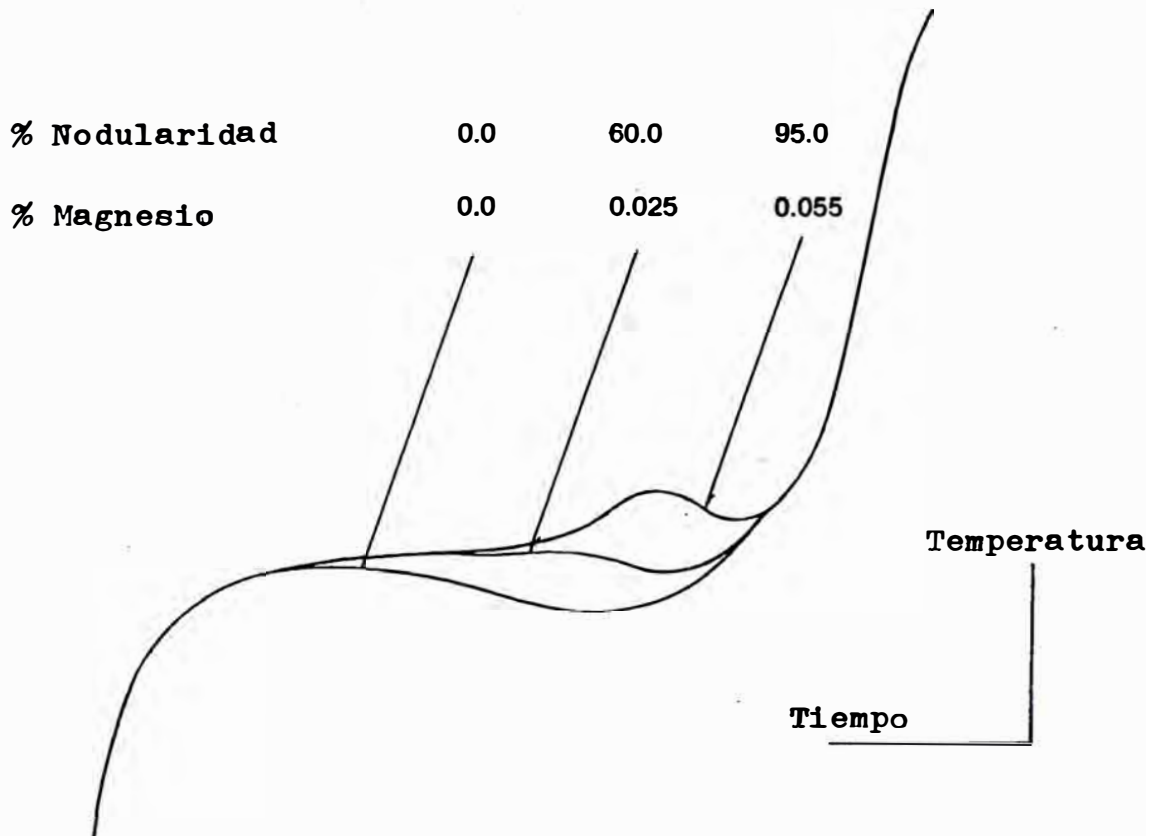


FIGURA 13.2.- Influencia del decrecimiento del Mg sobre las curvas de enfriamiento y la correspondiente declinación en el contenido de Mg.

**C A P I T U L O   X I V   .-   C O N C L U S I O N E S   Y   R E C O M E N D A C I O N E S**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1.- Actualmente, la producción mundial de fundición nodular asciende a 20 millones de toneladas y tiende a aumentar.
- 2.- Los fabricantes de fundición nodular deben dirigir sus esfuerzos en: mantener los altos estándares de calidad, ser competitivos, promover actividades técnicas, mediante publicaciones, hojas de información, certámenes técnicos y capacitar al personal involucrado en la producción de esta aleación.
- 3.- La estructura de la fundición nodular consiste de esferoides de grafito embebidos dentro de una matriz, estos ejercen una pequeña influencia sobre las propiedades mecánicas, a diferencia de las láminas de grafito en la fundición gris. La mayor influencia sobre las propiedades mecánicas es ejercida por la matriz de la estructura.
- 4.- La cantidad de grafito presente es alrededor de 8 a 10% en volumen. También, pueden estar presentes los carburos ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ); sin embargo, con excepción de la fundición nodular austenítica, estos son indeseables. Los carburos reducen drásticamente la resistencia y tenacidad.
- 5.- Es importante destacar, que cuando están presentes los carburos, estos aparecen de 3 tipos diferentes:
  - a) El más común es originado por condiciones metalúrgicas inadecuadas para una velocidad de enfriamiento dada. El carburo se presenta como una fase continua.
  - b) Los carburos aparecen como agujas largas bajo el microscopio; sin embargo, en realidad son placas de cristales de carburos. Este tipo, se produce por un exceso de Mg u otro nodulizante.
  - c) El tercer tipo de carburos, usualmente, se presenta en piezas fundidas de espesores relativamente gruesos, con exceso Mn y, posiblemente, también Cr, V, Mo, etc.
- 6.- La matriz de la fundición nodular puede controlarse por la composición del hierro base, por la práctica de fundición y/o tratamiento térmico, alcanzándose una resistencia a la tracción -

mínima de  $42 \text{ Kg/mm}^2$  con más del 25% de alargamiento, hasta una resistencia a la tracción de  $105 \text{ Kg/mm}^2$  y de 1 a 4% de alargamiento.

- 7.- En la condición de "bruto de colada" la matriz de la fundición nodular, mayormente presenta ferrita y perlita en diversas proporciones.
- 8.- Existen 3 tipos posibles, adicionales, de matriz de la fundición nodular:
  - a) Matriz martensítica, obtenida con el templado en aceite o agua, a partir de la temperatura de austenitización.
  - b) Matriz de martensita revenida, obtenida por la transformación de la martensita, sometida a un revenido, pieza calentada a  $425 - 700 \text{ }^\circ\text{C}$  y enfriamiento en el horno con circulación de aire. A mayor temperatura de revenido, la matriz se torna más gruesa y blanda.
  - c) Matriz "bainítica" o "acicular", obtenida en la condición de "bruto de colada" o por un tratamiento isotérmico de una fundición nodular aleada con Ni y/o Mo.
- 9.- La fundición nodular combina las principales ventajas de la fundición gris (bajo punto de fusión, buena fluidez y colabilidad, excelente maquinabilidad y buena resistencia al desgaste), con las ventajas del acero (alta resistencia, tenacidad, ductilidad, trabajado en caliente y templabilidad).
- 10.- Todos los elementos influyen sobre la estructura y propiedades de la fundición nodular, estos efectos pueden agruparse en:
  - Presencia o ausencia de carburos.
  - Forma y distribución del grafito.
  - Estructura de la matriz.
- 11.- Los elementos que promueven una estructura libre de carburos, en la condición de "bruto de colada" son, principalmente el C y Si; sin embargo, si se exceden los límites indicados, se producirá la "flotación del carbono" en secciones medianas y gruesas. El Si es un fortalecedor de la ferrita, además aumenta dureza, particularmente en la condición recocida.

- 12.- El Mn es un promotor de carburos, moderadamente fuerte, debe controlarse su % para evitar la presencia de carburos en "bruto de colada", su % se limita a un máximo que depende del %Si y el espesor de sección. La elección del %Mn es independiente del tipo de matriz deseada. En piezas delgadas, hasta 1" de espesor, la tendencia del Mn de promover carburos, puede contrarrestarse aumentando el %Si. Por ejemplo, en piezas de 1/2" de espesor, un aumento en el %Si de 2.5 a 3.0%, permitirá un aumento en el %Mn de 0.25 a 0.35%.
- 13.- Son promotores de carburos, más potentes que el Mn: el Cr, V, B, Te y Mo; recomendándose los siguientes contenidos máximos: 0.05 %Cr, 0.03 %V, 0.003 %B, 0.003 %Te y 0.01 a 0.75 %Mo (los valores mayores corresponden a fundiciones nodulares bainíticas con bajo %Mn).
- 14.- Son elementos beneficiosos a la fundición nodular: el Mg, Ce, Ca, Li, Na, K, Sc, Be, Y y otros elementos nodulizantes.
- 15.- Existen otros elementos que también nodulizan como son: Al, As, Bi, C, Cd, Cu, Ni, Pb, Sb, Se, Si, Sn, Te, Ti, Zn, Zr y la mayoría de tierras raras.
- 16.- La distribución del grafito, es el número de esferoides de grafito por unidad de volumen y se mide por el número de esferoides de grafito por mm. El %C influye sobre la forma y tamaño del grafito, particularmente a través de su influencia en el carbono equivalente; los esferoides de grafito son pequeños y de mejor forma en las fundiciones nodulares hipereutécticas.
- 17.- El efecto del Si puede ser beneficioso o perjudicial. Por un lado, aumentando el %Si, se incrementa la cantidad de nódulos y generalmente mejora la forma esferoidal. Por otro lado, aumentando el %Si, se promueve la formación del grafito tipo "chunk", en piezas de secciones gruesas.
- 18.- Son elementos perjudiciales a la fundición nodular: el Al, As, Sb, Bi y Pb. Sin embargo, elementos como el As y Sb, tradicio

nalmente considerados nocivos, aún en pequeñas cantidades, ahora están añadiéndose deliberadamente en el laboratorio y a escala industrial, a fin de mejorar la forma esferoidal del grafito, o a veces para promover la perlita; en ambos casos, también se añade Ce.

- 19.- El Ce, puede ser perjudicial en ausencia de algunos otros elementos (trazas), produciendo el grafito tipo "chunk"; este efecto es, particularmente, pronunciado en las fundiciones nodulares austeníticas. Otros elementos que promueven este tipo de grafito son: Ca, Si y Ni.
- 20.- El grafito tipo "chunk" presente en las piezas fundidas de fundición nodular de sección gruesa, puede eliminarse con la adición de 0.002% de cualquiera de los 4 elementos (Pb, Sb, As y Bi).
- 21.- Los elementos que promueven el grafito laminar intercelular son: Bi, Pb, Sb, As, Cd, Al, Sn y Cu.
- 22.- El efecto promotor del grafito laminar de 1 %Al, puede neutralizarse con la adición de 0.03 %Ce.
- 23.- El C no ejerce ningún efecto sobre la matriz. Por otro lado, el Si influye bastante sobre el ratio perlita/ferrita, la dureza de la ferrita, la resistencia al impacto y la conductividad térmica.
- 24.- El %Mn no debe seleccionarse para controlar la estructura de la matriz, sino para obtener una fundición libre de carburos en la condición de "bruto de colada".
- 25.- El P disminuye la ductilidad, tenacidad, soldabilidad y es perjudicial a la solidez de la pieza. Por estas razones, se tolera hasta 0.04 %P. Puede añadirse hasta 0.10 %P conjuntamente con el Mo, para aumentar la resistencia a alta temperatura y la resistencia a la "fluencia serpeante". También, el P aumenta la resistencia a la abrasión de la fundición nodular, empleándose de 0.7 a 1.0 %P con 3.7 a 5.7 %Cu, esta aleación contiene una red dura y frágil de fosfuro eutéctico y



partículas de cobre libre, aumentándose la conductividad térmica.

- 26.- El Ti promueve la formación de grafito laminar, afectando la nodulización del grafito.
- 27.- Los elementos promotores de la perlita, en orden decreciente de efectividad son: Sn, Mo, P, Cu, Ti, Mn, Ni o Cr. De estos elementos no se aconseja el uso del P, Ti, Mn y Cr. El Mo o Ni, son caros y el Mo también promueve los carburos en los bordes de las células. El Cu y Sn, son los más eficientes y más económicos, para promover una matriz perlítica. Considerando su efectividad, el Sn es favorable; sin embargo, debe limitarse a un máximo de 0.05% para evitar la formación del grafito laminar y otras inclusiones. Puede emplearse hasta un 2 %Cu con resultados satisfactorios en la obtención de una matriz completamente perlítica.
- 28.- El Mo, aún cuando es un promotor de perlita, raramente se usa para este propósito; sin embargo, es muy útil para mejorar las propiedades a alta temperatura, hasta un 2% aumenta significativamente la resistencia a alta temperatura y la resistencia a la "fluencia serpeante". El Mo disminuye la ductilidad, por lo que en ciertos casos debe restringirse hasta 0.5 - 1.0 % y de 1.0 a 2.0 %Ni. El Ni actúa de forma similar al Mo. Un efecto adicional se deriva de la presencia de 0.5 a 1.0 %Al, la estructura del grafito necesita protegerse de los efectos perjudiciales del Al, esto se consigue con la adición de 0.03 %Ce.
- 29.- Fundiciones nodulares aleadas con 15 %Co, 0.9 %Mo o 1.5 %Cb (Nb), aumenta el límite de fluencia a alta temperatura, hasta 29 Kg/mm<sup>2</sup> a 500 °C, disminuyendo la elongación a 1 - 2%.
- 30.- Contenidos de Si de 3.5 a 7.0%, en las fundiciones nodulares, aumentan la resistencia a la oxidación a alta temperatura, alrededor de 800 °C, el contenido óptimo depende de las condiciones de servicio. Sin embargo, estas aleaciones son muy duras y frágiles al ambiente; para servicios de temperaturas moderadamente altos, es suficiente de 3.5 a 5.0 %Si.

B I B L I O G R A F I A

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- Alfred Boyles, "The Structure of Cast Iron", 1946 A.S.M.
- 2.- H. Morrogh, "Production of Nodular Graphite Structures in Gray Cast Irons", A.F.S. Transactions, Vol. 56, 1948.
- 3.- C. K. Donoho, "Producing Nodular Graphite with Magnesium", American Foundryman, Feb. 1949.
- 4.- E.T. Myskowski and R.P. Dunphy, "Improved Nodulizing Alloy", Steel, Sep. 5, 1949.
- 5.- J.E. Rehder, "An Introduction to the Annealing of Nodular Iron", A.F.S. Transactions, Vol. 58, 1950.
- 6.- E.M. Stein, "Nodular Iron Experiments", The Foundry, Nov. 1950.
- 7.- W.H. White, L.D. Rice and A.R. Elsea, "Influence of Silicon on Mechanism and High Temperature Properties of Nodular Cast Irons", A.F.S. Transactions, Vol. 59, 1951.
- 8.- J.E. Rehder, "Effect of Phosphorus Content on Mechanical Properties of Nodular Cast Iron", A.F.S. Transactions, Vol. 59, 1951.
- 9.- H. Morrogh, "Influence of Some Residual Elements and Their Neutralization in Magnesium-treated Nodular Irons", A.F.S. Transactions, Vol. 60, 1952.
- 10.- R.P. Dunphy, and W.S. Pellini, "Solidification of Nodular Iron in Sand Molds", A.F.S. Transactions, Vol. 60, 1952.
- 11.- D.J. Reese, F.B. Rote, and G.A. Conger, "Chemistry and Section Size on Properties of Ductile Iron", S.A.E. Quarterly Transactions, July 1952.
- 12.- Sam F. Carter, "American Experiences with Basic Cupola Melting", A.F.S. Transactions, Vol. 61, 1953.
- 13.- Ductile Iron Bulletin - INCO, Oct. 1953.
- 14.- B.C.I.R.A. Research Report N<sup>o</sup> 348.
- 15.- The Cupola and Its Operation, Second Edition 1954 - A.F.S.
- 16.- R.C. Shnay and S.L. Gertsman, "Rising of Nodular Iron", A.F.S. Transactions, Vol. 62, 1954.
- 17.- R.A. Flinn, D.J. Reese, and W.A. Spindler, "Rising of Ductile Cast Iron", A.F.S. Transactions, Vol. 63, 1955.
- 18.- E.M. Vebel, "Heat Treatment of Ductile Iron", Ductile Iron Bulletin 5, INCO, June 1956
- 19.- R.S. Zeno, and C.D. Walker, "Ductile Iron - How Heat Treatment Upgrades It", Steel, Sept. 16, 1957.
- 20.- Gray Iron Castings Handbook, Published by G.I.F.S., 1958.
- 21.- Ductile Iron Bulletin 7 - INCO, Mar. 1958.

- 22.- H.E. Henderson, "Acid Cupola Melting for Ductile Iron", A.F.S. Transactions, Vol. 67, 1959.
- 23.- D.M. Marsh, "Gating and Riserling Ductile Iron Castings Poured in Dry Sand Molds", A.F.S. Transactions, Vol. 68, 1960.
- 24.- C.K. Donoho, "Solidification of Cast Iron", Modern Castings, Apr. 1960.
- 25.- R. Schulze, "Calcium Carbide Use in Acid Cupola", Modern Castings, July 1961.
- 26.- J.V. Dawson, "Effect of Carbon Equivalent on The Soundness of Nodular Iron Castings", B.C.I.R.A. Journal, Vol. 10, Mar. 1962.
- 27.- N.I. Klochnev, "Solidification Behavior of Magnesium-Treated Irons in Massive Castings", Russian Castings Production, Jan. 1963.
- 28.- J.G. Frantzreb, W.T. Bott, and R.M. Hedstrom, "Nodular Iron Microstructures in Constructional Castings", Foundry, Feb. 1964.
- 29.- A.A. Baranov, "The Influence of Composition and Structure on the Growth of Nodular Cast Iron", Russian Castings Production, Jan. 1965.
- 30.- "Analyses of Casting Defects", American Foundrymen's Society.
- 31.- Stephen I. Karsay, "Ductile Iron Production" Vol. 1, 1969.
- 32.- "In Mold Process", International Meehanite Company, 1971.
- 33.- D.M. Stefaneicu, "Inoculation of Ductile Iron with Barium and Cerium Alloys", Cast Metals Research Journal, Vol. 1, 1973.
- 34.- W.J. Evans, J.C. Harkness, and J.F. Wallace, "Factors Influencing the Formation of Pinholes in Gray Iron and Ductile Iron", Ductile Iron Society Research Project N<sup>o</sup> 6, 1974.
- 35.- W.A. Henning, "A New Method of Continuously Desulfurizing Cupola Iron", Ductile Iron Society Meeting, June 18, 1975
- 36.- R.W. Heine, "Riserling Principles Applied to Ductile Iron Castings Made in Green Sand", Vol. 87, Transactions A.F.S. 1979.
- 37.- R.W. Heine, "Design Method for Tapered Riser Feeding of Ductile Iron Castings in Green Sand", Transactions A.F.S., Vol. 90, 1982.
- 38.- G.A. Corlett, and J.V. Anderson, "Experiences with an Applied Riserling Technique for the Production of Ductile Iron Castings", Transactions A.F.S., Vol. 91, 1983.
- 39.- Serie "Ductile Iron", Modern Casting, 1983.

**A N E X O S**

HOJA DE DATOS GENERALES.- FUNDICION NODULAR GRADO 60-40-18

Este grado de fundición nodular tiene una matriz ferrítica obtenida por recocido. Se usa cuando se requiere ductilidad y buena resistencia al impacto.

PROPIEDADES MECANICAS TIPICAS

Resistencia a la tracción, en $\text{Kg/mm}^2$	= 42.18 $\text{Kg/mm}^2$
Límite de proporcionalidad	= 20.39
Límite de fluencia del 0.1%	= 28.12
Límite de fluencia del 0.2%	= 29.53
Límite de fluencia del 0.5%	= 30.23
Elongación (18% mínimo) hasta 27%	
Resistencia a la compresión	
Límite de proporcionalidad	= 24.26 $\text{Kg/mm}^2$
Resistencia al corte	
Aprox. 0.9 x resist. a la trac.	= 39.86 $\text{Kg/mm}^2$
Resistencia a la torsión	
Aprox. 0.9 x resist. a la trac.	= 39.86 $\text{Kg/mm}^2$
Límite de proporcionalidad = 0.75 x lím. de flu. del 0.1%	= 15.82 $\text{Kg/mm}^2$
Límite de fluencia del 0.1%	= 21.09
Límite de fluencia del 0.2%	= 21.80
Límite de fluencia del 0.5%	= 22.85
Módulo de elasticidad	
En tensión	= 17.22 x 10 <sup>3</sup> $\text{Kg/mm}^2$
En compresión	= 17.22 x 10 <sup>3</sup>
Módulo de rigidez	
0.39 x módulo de elasticidad en tensión	= 6.75 x 10 <sup>3</sup> $\text{Kg/mm}^2$
Relación de Poisson	= 0.275
Límite de fatiga	
Sin entalle	= 21.09 $\text{Kg/mm}^2$ a 23.20 $\text{Kg/mm}^2$
Dureza	= 134 a 145 Brinell
Propiedades de impacto - Charpy	
Temperaturas de transición de dúctil a frágil	
Con entalle, de -9 °C a -51 °C a medida que la tracción incrementa	
Sin entalle, de -51 °C a -90 °C a medida que la tracción incrementa	
Valores de impacto a 22 °C	
Con entalle, mínimo	= 1.38 m-Kg
Con entalle, fractura dúctil	= 1.66 m-Kg a 1.94 m-Kg
Sin entalle, fractura dúctil	= 11.06 m-Kg a 13.83 m-Kg
Sin entalle, fractura frágil	= 0.28 m-Kg a 0.41 m-Kg

COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA

Rango de temperatura	Coefficiente promedio de expansión, en $\text{cm/cm } ^\circ\text{C}$
20 °C a 100 °C	11.2 x 10 <sup>-6</sup>

20 °C a 200 °C	12.2 x 10 <sup>-6</sup>
20 °C a 300 °C	12.8 x 10 <sup>-6</sup>
20 °C a 400 °C	13.1 x 10 <sup>-6</sup>
20 °C a 500 °C	13.5 x 10 <sup>-6</sup>
20 °C a 600 °C	13.7 x 10 <sup>-6</sup>
20 °C a 760 °C	14.8 x 10 <sup>-6</sup>
20 °C a 871 °C	15.3 x 10 <sup>-6</sup>

#### CONDUCTIVIDAD TERMICA

Temperatura	Conductividad térmica, en cal/cm <sup>2</sup> /°C
100 °C	0.0872
200 °C	0.0868
300 °C	0.0864
400 °C	0.0860
500 °C	0.0856

#### PROPIEDADES MAGNETICAS Y ELECTRICAS

Permeabilidad magnética máxima, en u máx.	= 1,700
Magnetismo remanente	= 5,600 gauss
Fuerza coerciva	= 2 oersted
Pérdida por histéresis por ciclo (para B = 10,000 gauss)	= 6,000 erg/cm <sup>3</sup>
Resistividad eléctrica específica	= 50 x 10 <sup>-6</sup> ohm cm

#### ESFUERZOS DE DISEÑO

Tensión directa	= 14.06 Kg/mm <sup>2</sup>
Compresión directa	= 17.23 Kg/mm <sup>2</sup>
Fatiga alternativa	= 6.96 (sin entalle) Kg/mm <sup>2</sup>

HOJA DE DATOS GENERALES.- FUNDICION NODULAR GRADO 65-45-12

Este grado de fundición nodular tiene principalmente una matriz ferrítica con una cantidad relativamente pequeña de perlita. Esta estructura puede producirse a partir de fierros base con bajo Mn o con un tratamiento térmico.

PROPIEDADES MECANICAS TIPICAS

Resistencia a la tracción, en  $\text{Kg/mm}^2$  = 45.70  $\text{Kg/mm}^2$   
Límite de proporcionalidad = 20.39  
Límite de fluencia del 0.1% = 28.83  
Límite de fluencia del 0.2% = 31.64  
Límite de fluencia del 0.5% = 33.04  
Elongación (12% mínimo) hasta 17%

Resistencia a la compresión  
Límite de proporcionalidad = 23.55  $\text{Kg/mm}^2$

Resistencia al corte  
Aprox. 0.9 x resist. a la trac. = 41.83  $\text{Kg/mm}^2$

Resistencia a la torsión  
Aprox. 0.9 x resist. a la trac. = 41.83  $\text{Kg/mm}^2$   
Límite de proporcionalidad = 0.75 x lím. de flu. del 0.1% = 34.28  $\text{Kg/mm}^2$   
Límite de fluencia del 0.1% = 22.50  
Límite de fluencia del 0.2% = 23.20  
Límite de fluencia del 0.5% = 24.26

Módulo de elasticidad  
En tensión =  $17.22 \times 10^3 \text{ Kg/mm}^2$   
En compresión =  $17.22 \times 10^3 \text{ Kg/mm}^2$

Módulo de rigidez  
0.39 x módulo de elasticidad en tensión =  $6.75 \times 10^3 \text{ Kg/mm}^2$

Relación de Poisson = 0.275

Límite de fatiga  
Sin entalle = 23.20  $\text{Kg/mm}^2$

Dureza = 150 a 200 Brinell

Propiedades de impacto - Charpy

Temperaturas de transición de dúctil a frágil

Con entalle, de -10 °C a 30 °C a medida que la tracción incrementa

Sin entalle, de -60 °C a -10 °C a medida que la tracción incrementa

Valores de impacto a 22 °C

Con entalle, mínimo = 1.38 m-Kg

Con entalle completamente = 1.66 m-Kg a 1.94 m-Kg

Sin entalle, completamente dúctil = 11.06 m-Kg a 15.21 m-Kg

Con entalle, frágil = 0.21 m-Kg a 0.28 m-Kg

Sin entalle, completamente frágil = 0.28 m-Kg a 0.41 m-Kg

COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA

Sus valores son iguales a la fundición nodular grado 60-40-18.



CONDUCTIVIDAD TERMICA

Sus valores son iguales a la fundición nodular grado 60-40-18

PROPIEDADES MAGNETICAS Y ELECTRICAS

Sus valores son iguales a la fundición nodular grado 60-40-18

ESFUERZOS DE DISEÑO

Tensión directa =  $14.06 \text{ Kg/mm}^2$

Compresión directa =  $17.23 \text{ Kg/mm}^2$

Fatiga alternativa, sin entalle =  $6.93 \text{ Kg/mm}^2$

HOJA DE DATOS GENERALES.- FUNDICION NODULAR GRADO 80-55-06

Este grado de fundición nodular tiene una matriz de ferrita y perlita. Usualmente, se produce en la condición de bruto de colada, sin embargo puede producirse por un tratamiento térmico de normalizado. Este es un grado intermedio de fundición nodular que tiene una resistencia a la tracción mayor que la del grado ferrítico, además tiene un considerable grado de ductilidad y resistencia al impacto.

PROPIEDADES MECANICAS TIPICAS

- Resistencia a la tracción, en  $\text{Kg/mm}^2$  = 56.25  $\text{Kg/mm}^2$   
Límite de proporcionalidad = 21.16  
Límite de fluencia del 0.1% = 33.75  
Límite de fluencia del 0.2% = 38.67  
Límite de fluencia del 0.5% = 40.08  
Elongación (6% mínimo) hasta 12%
- Resistencia a la compresión  
Límite de proporcionalidad = 28.12  $\text{Kg/mm}^2$
- Resistencia al corte  
Aprox. 0.9 x resist. a la trac. = 50.62  $\text{Kg/mm}^2$
- Resistencia a la torsión  
Aprox. 0.9 x resist. a la trac. = 50.62  $\text{Kg/mm}^2$   
Límite de proporcionalidad = 0.75 x lím. de flu. del 0.1% = 25.31  $\text{Kg/mm}^2$   
Límite de fluencia del 0.1% = 27.42  
Límite de fluencia del 0.2% = 28.83  
Límite de fluencia del 0.5% = 30.23
- Módulo de elasticidad  
En tensión =  $17.58 \times 10^3 \text{ Kg/mm}^2$   
En compresión =  $17.58 \times 10^3 \text{ Kg/mm}^2$
- Módulo de rigidez  
0.39 x módulo de elasticidad en tensión =  $6.85 \times 10^3 \text{ Kg/mm}^2$
- Relación de Poisson = 0.275
- Límite de fatiga, sin entalle = 26.72  $\text{Kg/mm}^2$
- Dureza = 170 a 240 Brinell
- Propiedades de impacto - Charpy  
Temperaturas de transición de dúctil a frágil  
Con entalle, de -10 °C a 30 °C a medida que la tracción incrementa  
Sin entalle, de -60 °C a -10 °C a medida que la tracción incrementa  
Valores de impacto a 22 °C  
Con entalle, mínimo = 0.69 m-Kg

COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA

Rango de temperatura	Coefficiente promedio de expansión, en $\text{cm/cm } ^\circ\text{C}$
20 °C a 100 °C	$10.6 \times 10^{-6}$
20 °C a 200 °C	$11.7 \times 10^{-6}$

20 °C a 300 °C	12.4 x 10 <sup>-6</sup>
20 °C a 400 °C	13.1 x 10 <sup>-6</sup>
20 °C a 500 °C	13.3 x 10 <sup>-6</sup>
20 °C a 600 °C	13.5 x 10 <sup>-6</sup>
20 °C a 760 °C	14.8 x 10 <sup>-6</sup>
20 °C a 871 °C	15.3 x 10 <sup>-6</sup>

#### CONDUCTIVIDAD TERMICA

Sus valores son iguales a la fundición nodular grado 60-40-18.

#### PROPIEDADES MAGNETICAS Y ELECTRICAS

Permeabilidad magnética máxima, en u máx.	= 1,300
Magnetismo remanente	= 5,800 gauss
Fuerza coerciva	= 5.7 oersted
Pérdida por histéresis por ciclo (para B = 1,000 gauss)	= 13,000 erg/cm <sup>3</sup>
Resistividad eléctrica específica	= 51 x 10 <sup>-6</sup> ohm cm

#### ESFUERZOS DE DISEÑO

Tensión directa	= 15.82 Kg/mm <sup>2</sup>
Compresión directa	= 19.55 Kg/mm <sup>2</sup>
Fatiga alternativa	= 7.59 Kg/mm <sup>2</sup>

HOJA DE DATOS GENERALES.- FUNDICION NODULAR GRADO 100-70-03

Este grado de fundición nodular tiene una matriz perlítica obtenida por un tratamiento térmico de normalizado. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, este grado se produce en la condición de bruto de colada.

PROPIEDADES MECANICAS TIPICAS

Resistencia a la tracción, en  $\text{Kg/mm}^2$  = 70.31  $\text{Kg/mm}^2$   
Límite de proporcionalidad = 29.53  $\text{Kg/mm}^2$   
Límite de fluencia del 0.1% = 42.18  
Límite de fluencia del 0.2% = 49.22  
Límite de proporcionalidad = 54.84  
Elongación (3% mínimo) hasta 5%

Resistencia a la compresión  
Límite de proporcionalidad = 33.75  $\text{Kg/mm}^2$

Resistencia al corte  
Aprox. 0.9 x resist. a la trac. = 63.28  $\text{Kg/mm}^2$

Resistencia a la torsión  
Aprox. 0.9 x resist. a la trac. = 63.28  $\text{Kg/mm}^2$   
Límite de proporcionalidad = 28.12  
Límite de fluencia del 0.1% = 28.83  
Límite de fluencia del 0.2% = 30.94  
Límite de fluencia del 0.5% = 33.75

Módulo de elasticidad  
En tensión =  $17.58 \times 10^3 \text{ Kg/mm}^2$   
En compresión =  $17.58 \times 10^3 \text{ Kg/mm}^2$

Módulo de rigidez  
0.39 x módulo de elasticidad en tensión =  $6.96 \times 10^3 \text{ Kg/mm}^2$

Relación de Poisson = 0.275

Límite de fatiga, sin entalle = 29.53  $\text{Kg/mm}^2$

Dureza = 220 a 300 Brinell

Propiedades de impacto - Charpy

Temperaturas de transición de dúctil a frágil

Sin entalle, de 100 °C a 121 °C

Sin entalle, fractura a 22 °C = 0.69 m-Kg a 4.15 m-Kg

COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA

Sus valores son iguales a la fundición nodular grado 80-55-06.

CONDUCTIVIDAD TERMICA

Sus valores son iguales a la fundición nodular grado 80-55-06.

PROPIEDADES MAGNETICAS Y ELECTRICAS

Sus valores son iguales a la fundición nodular grado 80-55-06.

ESFUERZOS DE DISEÑO

*Sus valores son iguales a la fundición nodular grado 80-55-06.*

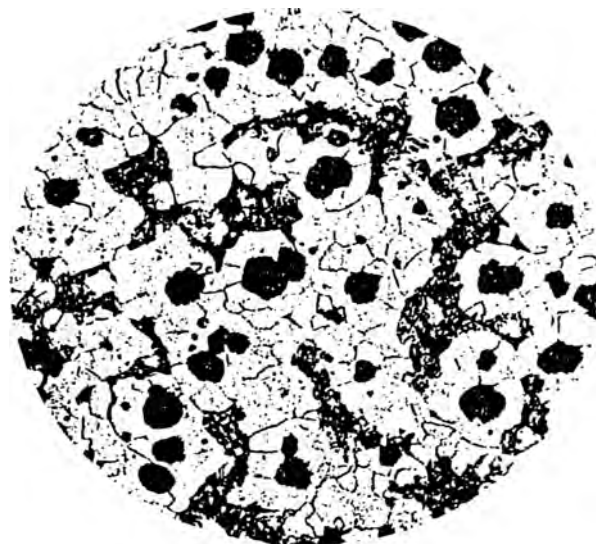
HOJA DE DATOS GENERALES.- FUNDICION NODULAR GRADO 120-90-02

*Este grado de fundición nodular es un grado tratado térmicamente. El procedimiento del tratamiento térmico consiste de un templado en aceite y revenido. Por esta razón, sus propiedades mecánicas y constantes físicas cubren un rango muy amplio, y datos completos o significativos no se encuentran disponibles.*

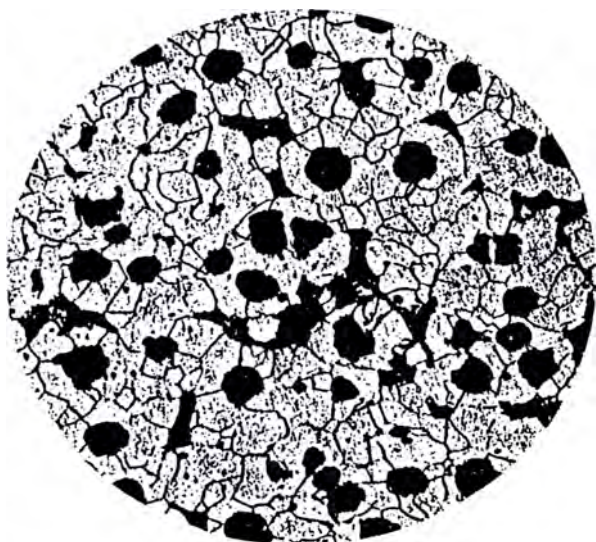
EFFECTO DEL TIEMPO SOBRE LA FERRITIZACION DE LA FUNDICION NODULAR A 732 °C



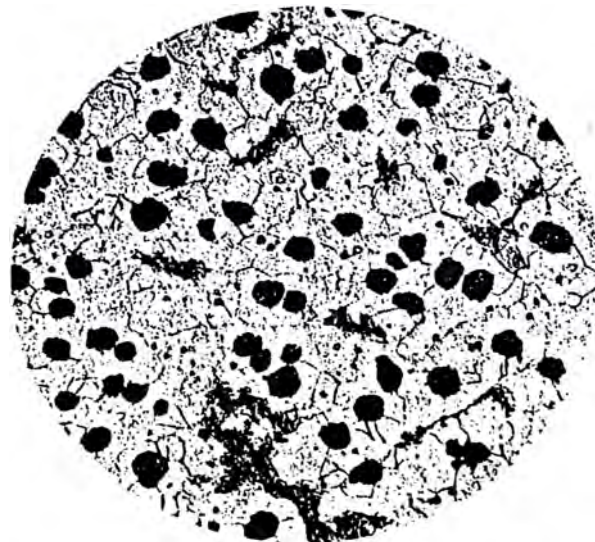
A.- En bruto de colada.



B.- Después de 5 min. a 732 °C.



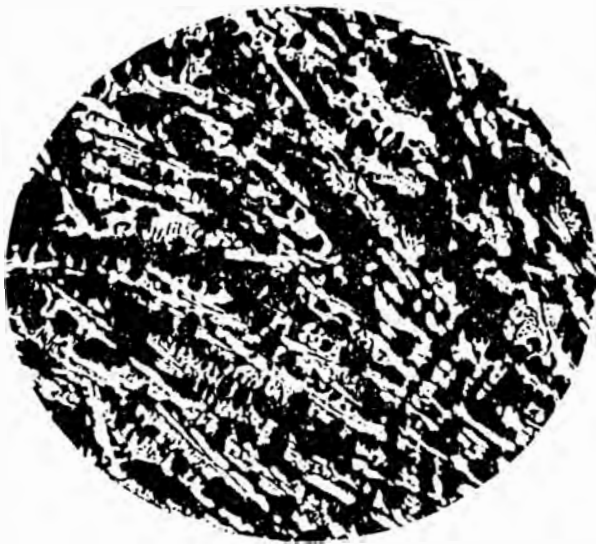
C.- Después de 10 min. a 732 °C.



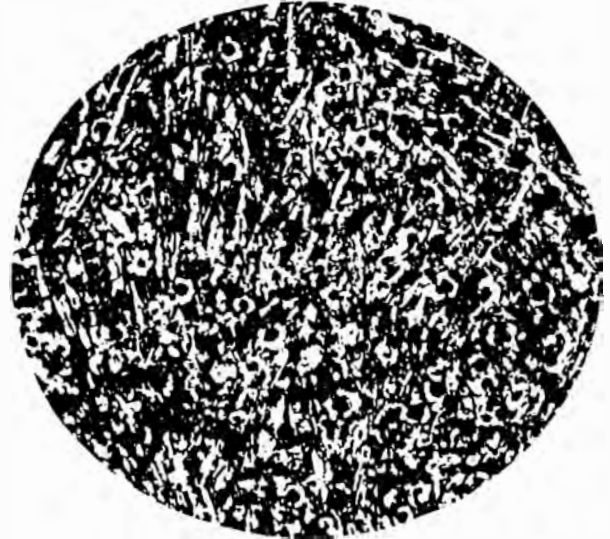
D.- Después de 15 min. a 732 °C.

FIGURA A 1.- Fundición nodular producida en Horno de Inducción de alta frecuencia, atacada con Nital al 2%, a 150 X. C total 3.48%; S 0.010%; Si 2.94%; Mn 0.092%; P 0.030%; Mg 0.074%. El tamaño de sección fue solamente de 1/4" en bruto de colada.

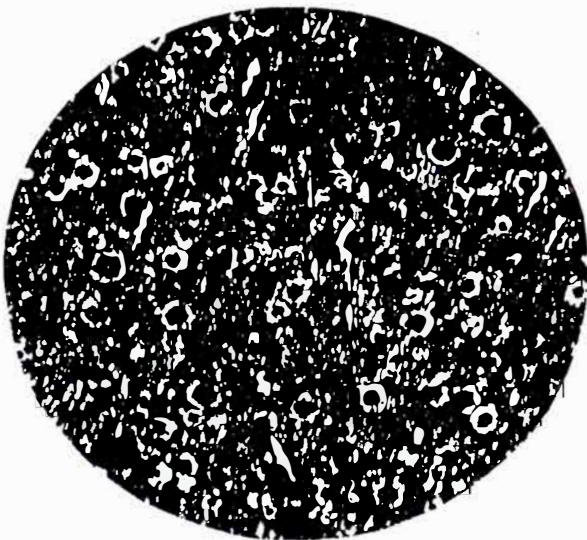
EFFECTO DEL TIEMPO SOBRE LA DESCOMPOSICION DE LA CEMENTITA A 900 °C



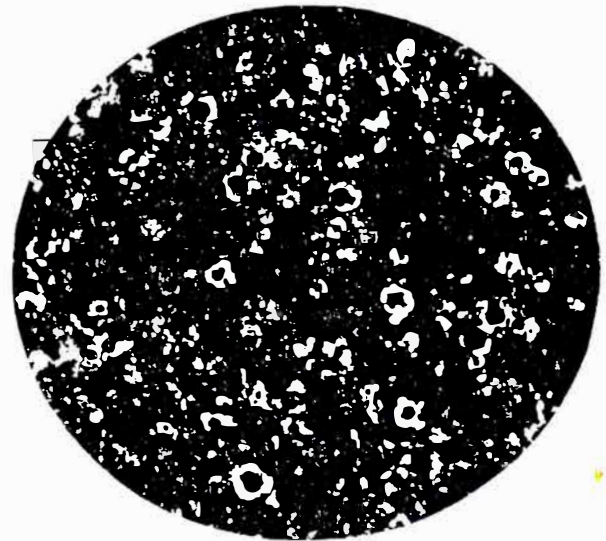
A.- En bruto de colada.



B.- Después de 5 min. a 900 °C



C.- Después de 15 min. a 900 °C.



D.- Después de 30 min. a 900 °C.

FIGURA A 2.- Fundición nodular de Horno de Inducción, atacada con Nital al 2%, a 150 X. C total 3.45%; S 0.010%; Si 1.94%; Mn 0.084%; P 0.021%; Mg 0.087%. En bruto de colada tiene 50% de cementita, debido al alto % retenido de Mg y bajo Si. Las muestras son de una sección de 1/4". Comparar con las microestructuras de alto Si, mostradas en la Figura A 1.