

Adaptación de tecnología en la fabricación de fundiciones nodulares

La producción de fundiciones nodulares de manera competitiva y económica, exige del conocimiento a fondo de las variables implicadas en el proceso; lo cual permite obtener la amplia gama de propiedades que reúne este grupo de aleaciones. En este documento se presentan los resultados y conclusiones alcanzados, al hacer algunas modificaciones en las variables de los procesos de fabricación. Además, se muestra el horno de cubilote como una alternativa al alcance de la pequeña y la mediana industria para la producción económica de fundiciones nodulares.

HECTOR MOSQUERA MOSQUERA
Ingeniero especializado en Metalurgia Física y Fundición

Colaboradores:

ALVARO FORERO M.
Ingeniero Metalúrgico M.S. en Metalurgia Física

HECTOR DELGADO F.
Ingeniero Metalúrgico

FELIX OCHOA M.
Ingeniero Metalúrgico

Con el auspicio de Colciencias, OEA, Universidad Nacional, y con la colaboración de algunas empresas, se ha realizado una serie de investigaciones, tendientes a generalizar la fabricación y utilización de las fundiciones nodulares en Colombia.

Los trabajos fueron encaminados por las siguientes cuatro áreas principales:

Adaptación de los procesos de fabricación de hierro nodular en Colombia (de lo cual se ocupa el presente artículo).

Aspectos económicos relacionados con los costos-beneficios de los distintos procesos de fabricación y comercialización de las fundiciones nodulares (para ser publicado próximamente).

Estudio de las propiedades y aplicaciones de las fundiciones nodulares (en ejecución).

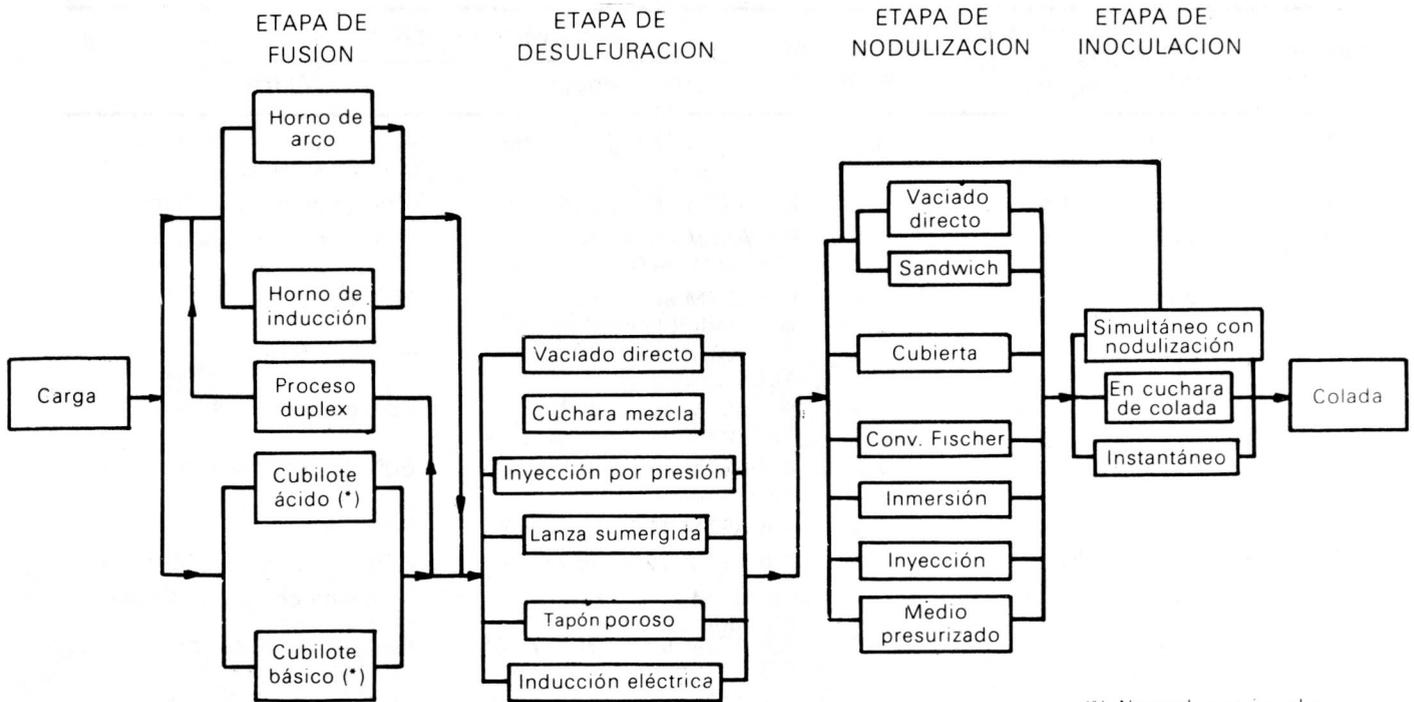
Tratamientos térmicos y soldabilidad de las fundiciones nodulares (en ejecución).

Las fundiciones nodulares presentan una amplia gama de propiedades que pueden lograrse mediante un control riguroso de las condiciones de producción y de los tratamientos térmicos, los cuales ocasionan variaciones microestructurales, tanto en tipo y tamaño de grafito, como en la clase, forma y distribución de la matriz.

Las fundiciones nodulares constituyen un grupo de aleaciones en las que se pueden desarrollar combinaciones de las principales ventajas de las fundiciones grises (bajo punto de fusión, adecuada fluidez y colabilidad, excelentes condiciones de maquinabilidad, gran capacidad de amortiguamiento, buena resistencia al desgaste y bajo costo de producción), con las ventajas del acero como material de ingeniería (alta resistencia mecánica, dureza, elevada ductilidad, resistencia en caliente y a la corrosión).

Con estas investigaciones se pretende, fomentar el desarrollo de la pequeña y la mediana industria de fundición; al mostrar cómo estas empresas pueden utilizar más eficientemente sus instalaciones, de modo que con pequeñas modificaciones en los equipos, una planta que fabrica buen hierro gris,

TABLA I.
Etapas involucradas en la fabricación de fundiciones nodulares



(*) Normal o mejorado

estaría en condiciones de producir una adecuada fundición nodular.

No se persigue con este documento discutir los diferentes procesos de fabricación de las fundiciones nodulares, puesto que se haría demasiado extenso; el objeto principal es presentar y comentar los resultados alcanzados al hacer ciertas modificaciones en los procesos de fabricación o en sus variables.

PROCESOS SEGUIDOS EN LA PRODUCCION DE FUNDICIONES NODULARES

En la fabricación de fundiciones nodulares intervienen las siguientes etapas: fusión, desulfuración, nodulización e inoculación; cada uno de estos pasos se puede realizar de diversas maneras como lo muestra la Tabla I.

Los procesos realizados en la investigación fueron los siguientes:

Fusión

Se llevó a cabo en las siguientes unidades de fusión:

1. Horno de cubilote ácido de diseño convencional.

Las características del horno fueron:

Diámetro del cubilote	30 cms.
Altura del crisol	42 cms.
Espesor del revestimiento (ácido)	15 cms.
Cantidad de toberas	6 (diseño para que funcionen 3 alternativamente)
Diámetro de las toberas	6.25 cms.

TABLA II
Resultados de las fundiciones nodulares obtenidas por diferentes procesos

Fundición nodular	Composición en %									T °C de nodulización	Unidad de fusión utilizada
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mg		
F1	3.0	2.59	0.54	0.03	0.18	0.36	0.21	—	0.02	1.400	
F2	3.3	2.55	0.58	0.02	0.16	0.40	0.15	—	0.05	1.385	Cubilote ácido convencional
F3	3.0	2.51	0.56	0.02	0.18	0.30	0.18	—	0.04	1.435	
F4	2.8	1.95	0.40	0.02	0.14	0.10	—	—	0.03	1.480	
F5	3.2	1.80	0.42	0.02	0.13	0.12	—	—	0.05	1.490	
F6	3.6	2.10	0.50	0.02	0.10	0.10	—	—	0.04	1.530	
F7	3.5	2.00	0.45	0.02	0.12	0.10	—	—	0.04	1.510	Cubilote ácido doble tobera y aire repartido
F8	3.3	3.50	0.25	0.01	0.01	0.30	0.04	—	0.04	1.550	
F9	3.4	3.00	0.60	0.01	0.10	0.39	0.05	—	0.05	1.550	Horno eléctrico de arco
F10	2.5	2.90	3.56	0.03	0.20	1.24	6.33	0.71	0.05	1.420	
F11	2.5	3.00	1.78	0.02	0.18	—	15.67	1.77	0.03	1.420	
F12	2.5	2.80	1.71	0.02	0.20	—	15.65	1.70	0.03	1.420	Horno de crisol con ACPM.

TABLA III.
Propiedades y microestructuras de los distintos hierros nodulares producidos.

Fundición nodular	Dureza Brinell	Resistencia a la tracción kg/mm ²	Alargamiento en %	Observación metalográfica	
				Grafito nodular	Matriz
F1	220	55.0	1.2	K 5 ASTM 120 nodulos/mm ²	Perlítica en un 40%, el resto es ferrita y steadita.
F2	235	65.0	1.8	K 5 ASTM en un 80%	60% de perlita y 40% ferrita.
F3	245	68.5	2.1	K 6 ASTM en un 90% 100 nódulos/mm ²	70% de perlita y 30% ferrita.
F4	265	74.0	1.9	K 6 ASTM en un 70% 80 nódulos/mm ²	Perlítica 90%
F5	250	70.0	2.1	K 6 ASTM en un 80% 100 nódulos/mm ²	Perlita + ferrita
F6	240	68.0	2.5	K 6 ASTM en un 80% 120 nódulos/mm ²	60% de perlita y 40% ferrita.
F7	242	69.0	2.3	K 6 ASTM en un 80% 120 nódulos/mm ²	60% de perlita y 40% ferrita.
F8	130	45.00	12.5	K 6 ASTM 125 nod./mm ²	Ferrítica.
F9	275	80.21	2.9	K 6 ASTM 120 nod./mm ²	85% de perlita + 15% ferrita.
F10	405	—	—	I 6 ASTM en un 90% 60 nódulos/mm ²	Austenita con gran cantidad de carburos.
F11	115	32.50	6.60	K 6 ASTM en un 90% y 10% II 5, 110 nódulos/mm ²	Austenítica exenta de carburos.
F11 T*	420			K 6 ASTM en un 90% y 10% II 5, 110 nódulos/mm ²	Martensítica
F12	120	34.00	5.00	K 6 ASTM en un 80% 110 nódulos/mm ²	Austenítica exenta de carburos
F12 T*	430			K 6 ASTM en un 80% 110 nódulos/mm ²	Martensítica

* Fundición nodular martensítica, obtenida por tratamiento térmico subcero por enfriamiento de la fundición austenítica F10 a 196°C (temperatura del aire líquido).

La clasificación del grafito se hizo según Norma ASTM A 395.

Inclinación de las toberas	25°
Las condiciones de operación que produjeron los mejores resultados son:	
Tiempo de encendido	4 horas
Altura de la cama de coque	90 cms.
Volumen del aire	13 m ³ /min.
Relación coque/chatarra	1:8
Tamaño promedio del coque	9 cms.
Tamaño de la chatarra	6 a 8 cms.
Carburo de calcio dentro del horno	1% del peso de la carga metálica
Peso de la carga metálica	45 kg.
Tiempo entre cargas	8 minutos

Los resultados se muestran en las Tablas II y III. Por dificultades surgidas para lograr temperaturas elevadas en el cubilote ácido de diseño convencional, que permitieran reducir el % de fósforo en el producto, por el hecho de aumentar el % de chatarra de acero estructural en las cargas, se tomaron las siguientes determinaciones:

Se realizó la evaluación de los espesores en que podría producirse un hierro nodular satisfactorio para una temperatura de nodulización de 1.400°C, que fue la máxima promedio lograda en es-

ta unidad de fusión, (ver foto 1), para lo cual se colaron las aleaciones F1 y F3. Los resultados se muestran en la Tabla IV.

Modificar el diseño del cubilote; esto fue considerado como la determinación más importante.



FOTO 1. A 7 aumentos diferentes espesores colados. Aleación F1 y F2.

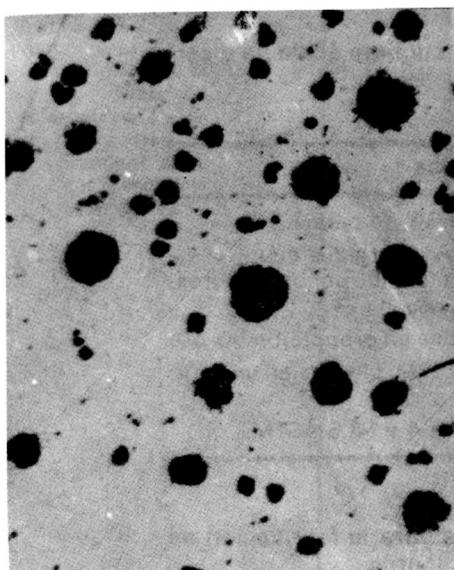


FOTO 2. A 100 aumentos. Aleación F2, grafito K5 ASTM.

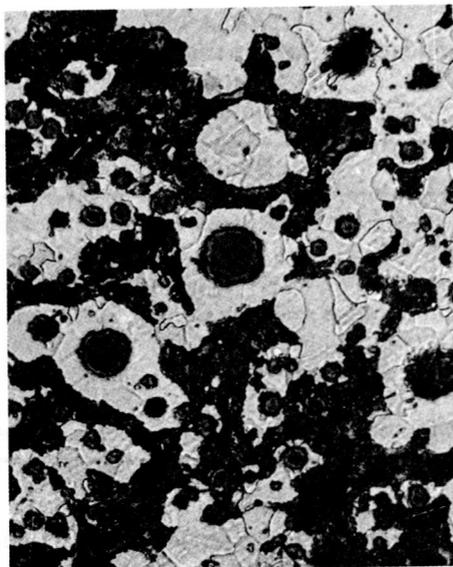


FOTO 3. A 100 aumentos fundición ferrítico-perlítica. Aleación F2.

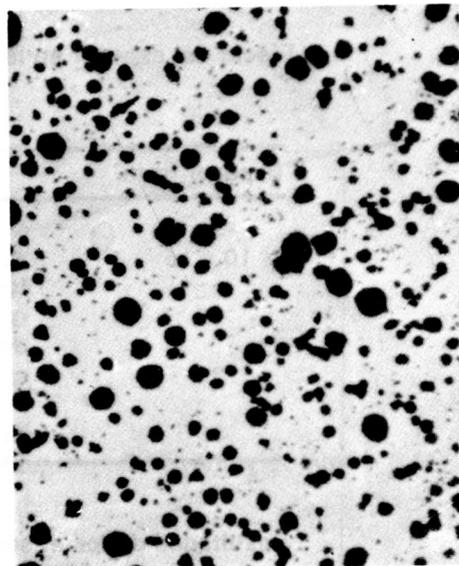


FOTO 4. A 100 aumentos. Nódulos K6 ASTM. Aleación F6.

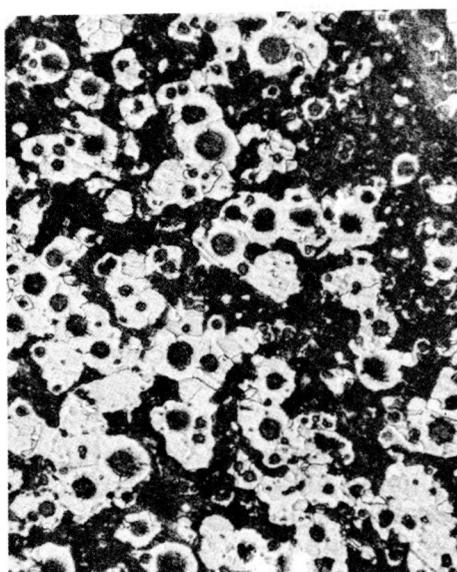


FOTO 5. A 100 aumentos ferrítico-perlítica. Aleación F6.

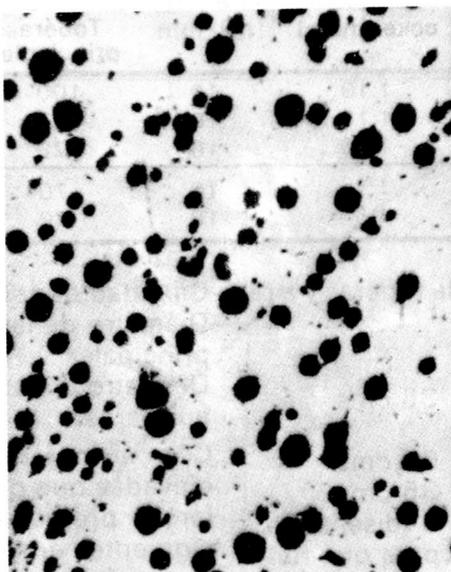


FOTO 6. A 100 aumentos. Nódulos K6 ASTM. Aleación F8.

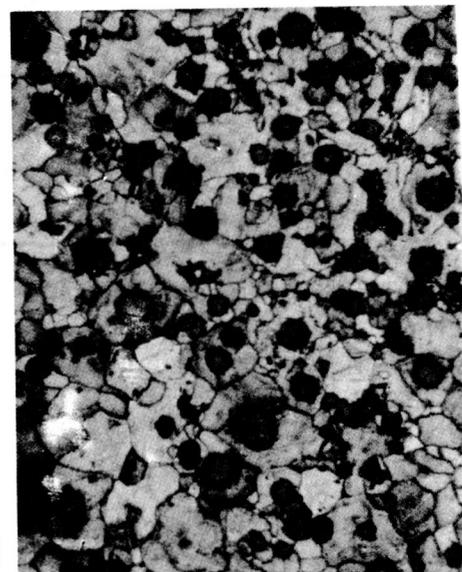


FOTO 7. A 100 aumentos. Fundición nodular ferrítica. Aleación F8.

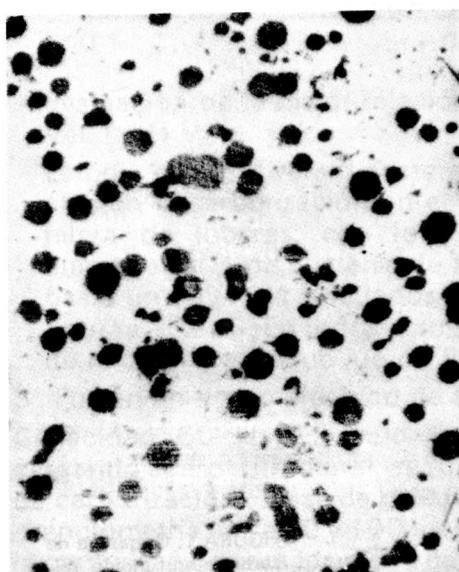


FOTO 8. A 100 aumentos. Nódulos K6 ASTM. Aleación F9.

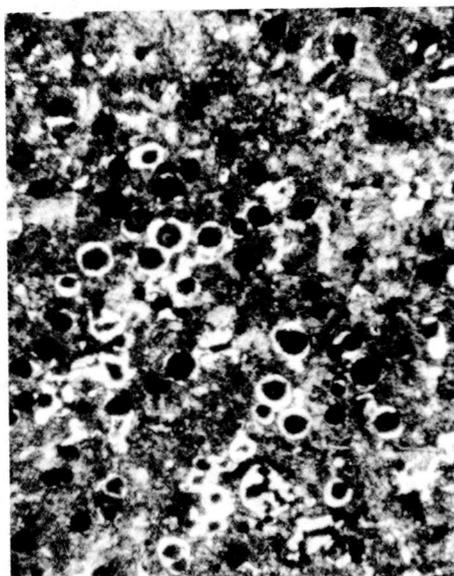


FOTO 9. A 100 aumentos. Fundición perlítica. Aleación F9.

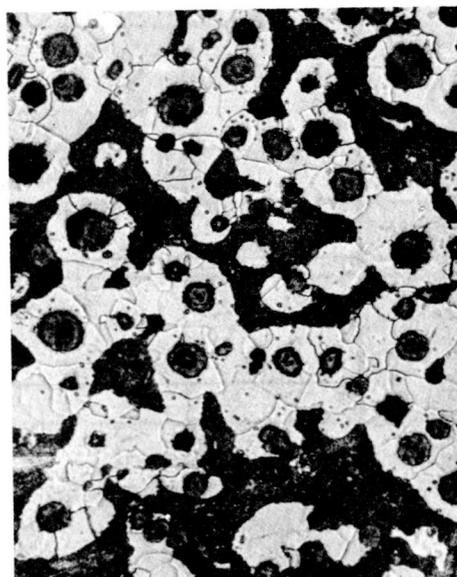


FOTO 10. A 100 aumentos. Fundición nodular ferrítico-perlítica. En cubilote doble tobera.

TABLA IV
Efecto del espesor en la calidad del hierro nodular producido en cubilote ácido de diseño convencional
Aleaciones F1 y F2

Espesor (mm)	Observación metalográfica
5 y 7	Grafito muy anormal, gran cantidad de carburo y de perlita.
10 y 15	Grafito degenerado tipo vernicular, muy pocos esferoides bien formados; 60% de perlita y 40% entre ferrita y steadita, pocos carburos.
20	Grafito nodular aceptable en un 60%, tamaño N° 6 ASTM; grafito degenerado en un 40%, matriz ferrítico-perlática en proporción 50-50.
25	Nódulos aceptables en un 80%; tamaño N° 5 ASTM. LFerrita en un 60%; el resto es perlita.
30	Grafito nodular bien formado, tamaño entre N° 4 y N° 5 ASTM.

TABLA V.
Resultados de los ensayos para lograr temperaturas adecuadas para la fabricación de hierro nodular en cubilote de doble hilera de toberas

Ensayo	Altura de la cama de coque (cm).	Relación coque/metal	Aire total m ³ /min	Reparto del aire en %		T°C alcanzada en piqueta
				Toberas principales	Toberas auxiliares	
1	80	1:10	10	100	0	1.360
2	80	1:10	10	50	50	1.415
3	80	1:10	10	70	30	1.430
4	80	1:7	10	70	30	1.490
5	80	1:6	10	70	30	1.526

2. Cubilote ácido con doble hilera de toberas y aire balanceado.

Características de diseño:

Diámetro del cubilote 36 cms.
 Distancia entre toberas principales y auxiliares 36 cms.
 Altura del crisol 35 cms.
 Cantidad de toberas principales 6 (diseñadas para que funcionen 3 alternativamente).

Cantidad de toberas auxiliares 3
 Diámetro de las toberas principales 8 cms.
 Diámetro de las toberas auxiliares 5 cms.

Con el objeto de conseguir las temperaturas elevadas que permitieran obtener un hierro nodular de propiedades aceptables, se realizaron los siguientes ensayos de fusión:

Consecución del reparto óptimo del aire entre toberas principales y auxiliares. Los resultados se muestran en la Tabla V.

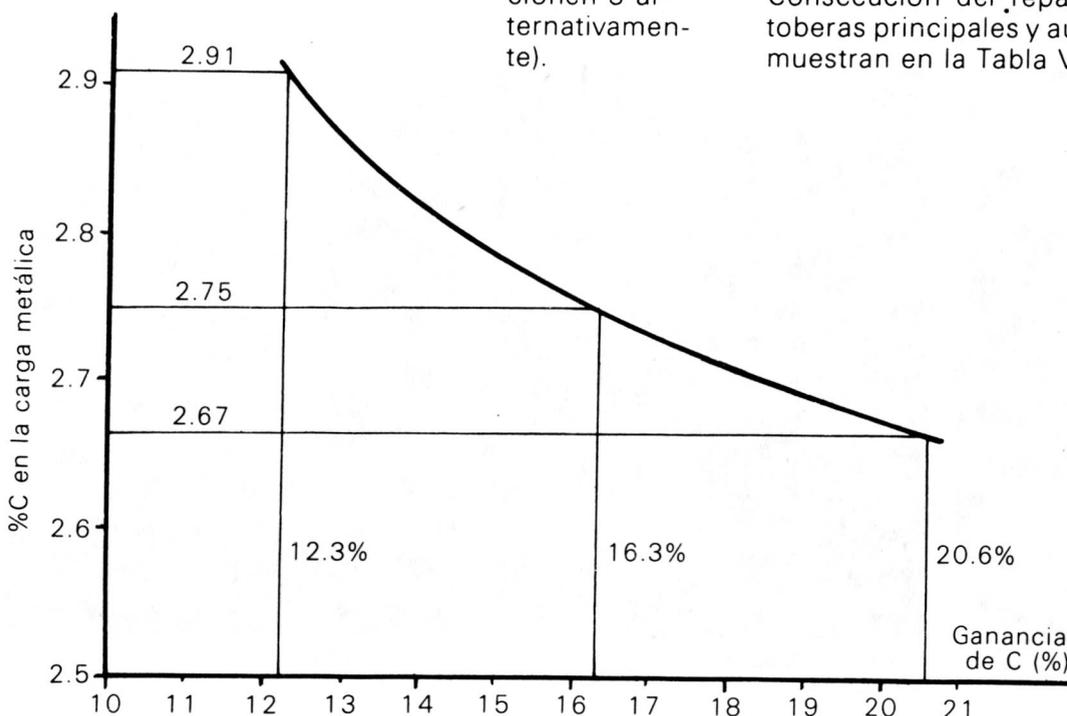


FIGURA 1. Ganancia de carbono en función del porcentaje de carbono en la carga metálica con relación hierro/coque constante (5/1).

FIGURA 2. % de carbono resultante como función de la relación hierro/coque para un porcentaje de carbono en la carga metálica (%C = 2.67).

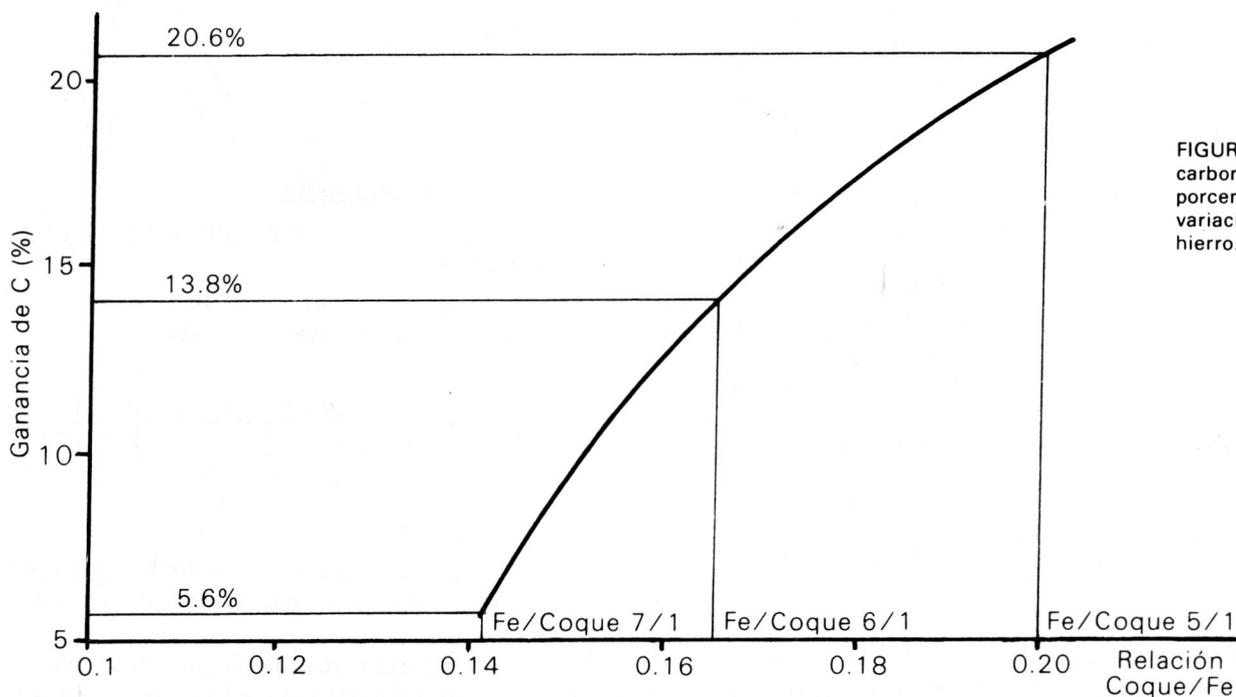
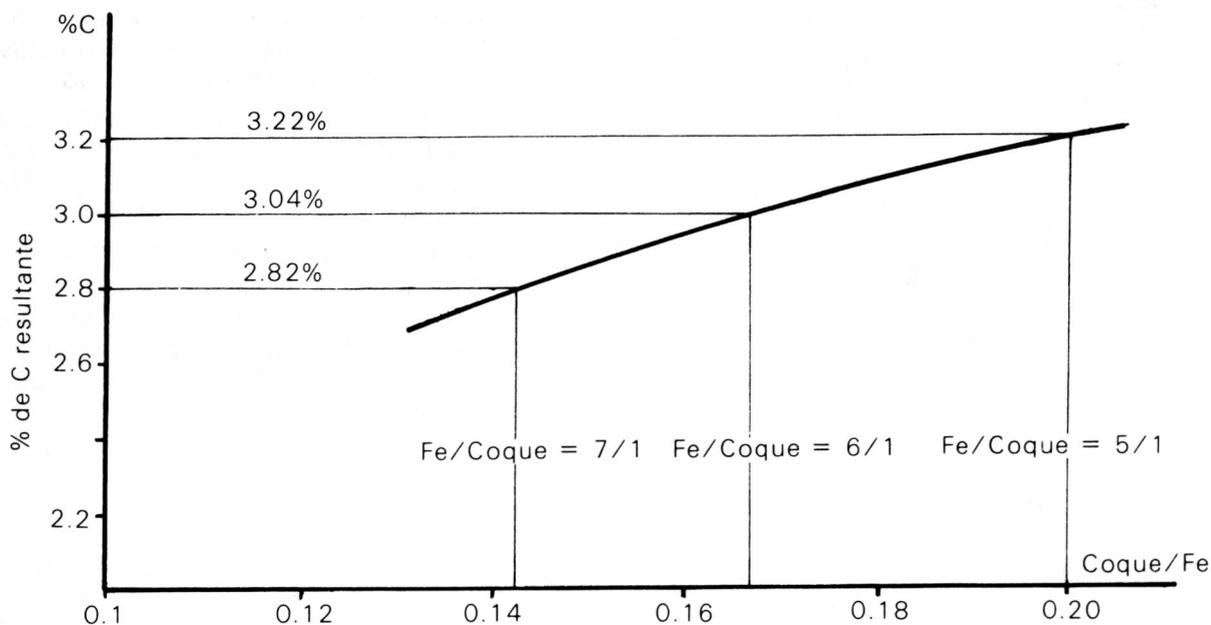


FIGURA 3. Ganancia de carbono expresada en porcentaje respecto a la variación de la relación hierro/coque.

- Evaluación de la mejor relación coque-chatarra. Ver Tabla V.
- Estudio de los diversos factores y variables que afectan la carburización en el cubilote de doble hilera de toberas; con lo cual se consiguió aumentar el % de chatarra de acero en la carga, hasta un 40%. Los resultados se muestran en las figuras 1, 2 y 3. En todos estos ensayos la altura de la cama de coque fue de 80 cms.

3. Fusión en horno eléctrico de arco:

Capacidad 60 kg. El baño líquido se preparó cargando acero estructural, seguido de un proceso de carburización a base de grafito pulverizado, con granulometría entre 40 y 100 mesh; la eficiencia de la carburización para la unidad de fusión utilizada se determinó experimentalmente por ensayos sucesivos a temperaturas de 1.550°C. La eficiencia máxima lograda fue de 50%, y la mínima de 41%.

TABLA VI.

Variación de la dureza del hierro nodular F9, con el tiempo de desmoldeo.

Tiempo de desmoldec en minutos	Dureza Brinell
5	320
10	290
15	275
22	265
35	240

El tiempo de carburización utilizado en todas las coladas fue de 1 minuto. Además, se realizó la evaluación del tiempo de desmoldeo en la dureza del hierro nodular resultante (ver Tabla VI).

4. Fusión en horno de crisol (ACPM). (Capacidad 150 kg.).

En este horno de crisol se fabricó la fundi-

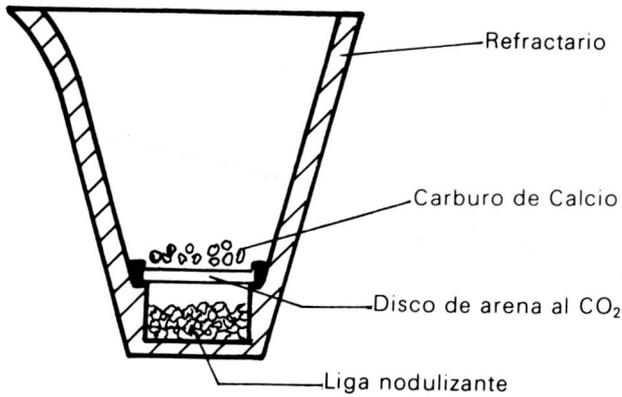


FIGURA 4. Cuchara de bolsillo profundo.

granulado, con tamaño entre 0.5 y 3.0 mm. La cantidad de carburo de calcio estuvo entre 1.2% y 1.5% del peso del baño líquido.

La agitación se realizó haciendo pasar nitrógeno por medio de una lanza sumergida (figura 5). La presión fue de 5 kg/cm².

Tiempo de tratamiento = 2 a 3 minutos
Cantidad tratada = 80 kg. en todos los casos.

Para evaluar el efecto de la finura del carburo de calcio en la desulfuración se trataron diferentes sangrías del cubilote, con azufre inicial de 0.15%; temperatura de 1.520°C; los resultados fueron los siguientes:

Finura del CaC ₂ en m.m.	% de S después del tratamiento
menos de 0.5	0.06
0.5	0.05
1.0	0.04
1.5	0.04
2.0	0.05
3.0	0.06
4.0	0.08
5.0	0.09
6.0	0.1
7.0	0.1

ción nodular austenítica. Temperatura alcanzada 1.420°C.

La selección de la composición se realizó, previa discusión del efecto físico-químico de los elementos aleantes, tanto en la formación de una microestructura austenítica exenta de carburos (no magnética), como en la formación del grafito en forma de nódulos; considerando además, aspectos económicos y que las propiedades logradas en estado fundido fueran comparables a las establecidas por normas: ASTM A436-61T y A 439-60T; International Nickel Co; British Standar B3468 (1962) y Normas ISO. Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones se estableció que el hierro nodular por producir debería tener los siguientes aleantes: níquel entre 14% y 17%; silicio entre 2.8% y 3.30%; manganeso máximo = 2.0%; cobre entre 1.0% y 2.0%; cromo = entre 0.00% y trazas. El carbono equivalente para fundiciones nodulares austeníticas se seleccionó de acuerdo con la fórmula:

$$CE = \%C + 0.33 \times \%Si + 0.047 \times \%Ni - 0.0055 \times \%Si \times \%Ni$$

Los resultados se muestran en las tablas II y III.

Desulfuración

Por razones de manejo del metal líquido para evitar excesivas pérdidas de temperatura en el baño se utilizó, tanto para la desulfuración como para la nodulización, una sola cuchara, tipo sandwich de bolsillo profundo (figura 4).

Como desulfurante se utilizó carburo de calcio

Nodulización

en la mayoría de los ensayos se utilizó liga hierro-silicio-magnesio al 9%.

El cálculo de la cantidad de liga de magnesio se realizó aplicando la siguiente ecuación:

$$Q = P \left[\frac{0.76 (S - 0.01) + K + t \times 10^{-3}}{R \times Mg/100} \right] \left[\frac{T}{1.450} \right]^2$$

en que

- Q = Cantidad de liga nodulizante, en kilogramos
- P = Peso de la fundición por tratar, en kilogramos.
- S = % de azufre, después de la desulfuración
- t = tiempo, medido o calculado entre la finalización de la nodulización y el comienzo de la colada en los moldes, en minutos.
- T = Temperatura en °C, en el momento del tratamiento.

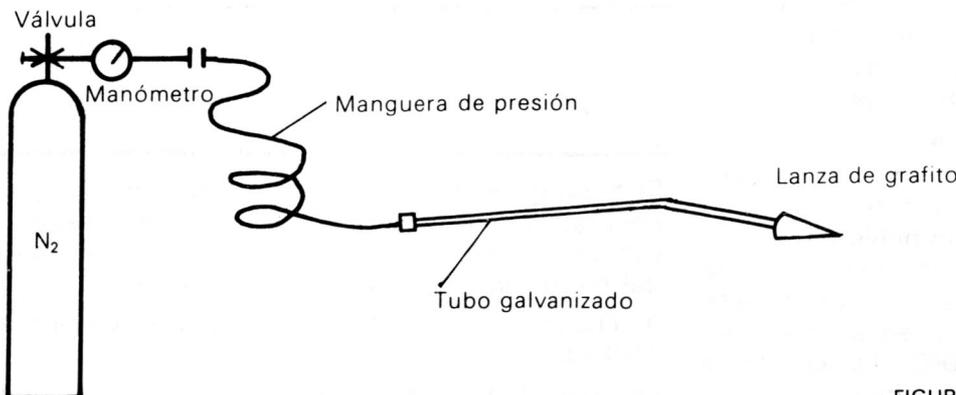


FIGURA 5. Equipo para la lanza sumergida

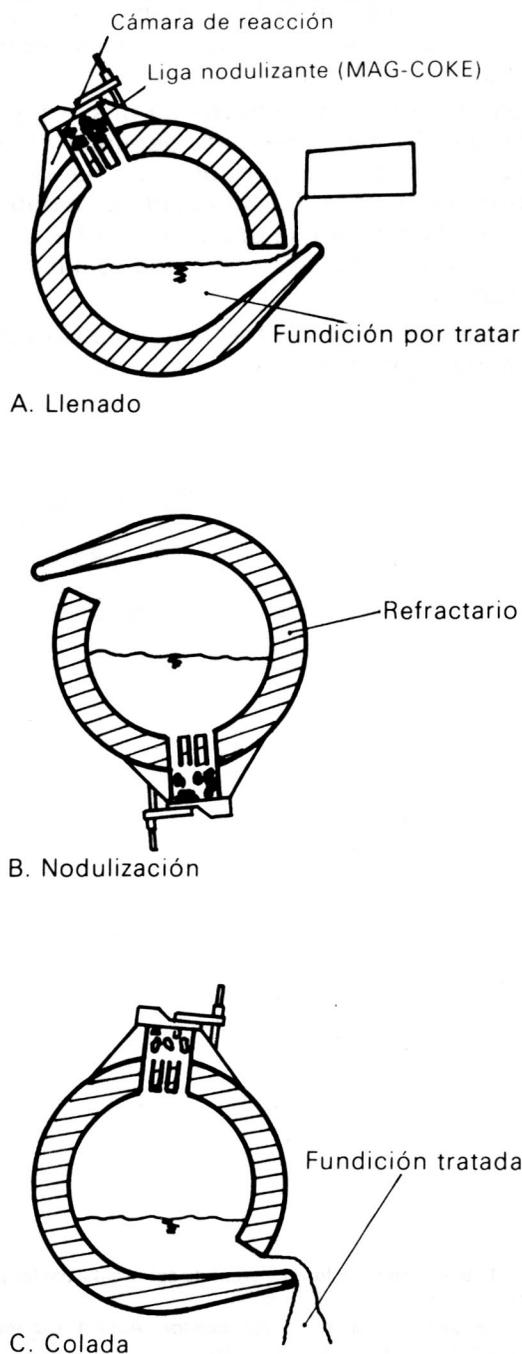


FIGURA 6. Secuencia del proceso Mag - Coke.

Mg = % de magnesio en la liga.
 K = % de Mg. residual, depende del proceso:
 K = 0.06 si la fusión es en cubilote ácido
 K = 0.04 si la fusión es en cubilote básico, crisol
 horno eléctrico.
 K = 0.03 si se efectúa desulfuración previa que
 reduzca el contenido de azufre a menos de
 0.015%.

$(t \times 10^{-3})$ = rata de pérdida de magnesio por
 desvanecimiento.

La cantidad de Mg que se pierde por minuto
 después del tratamiento es del orden de
 0.001%/minuto.

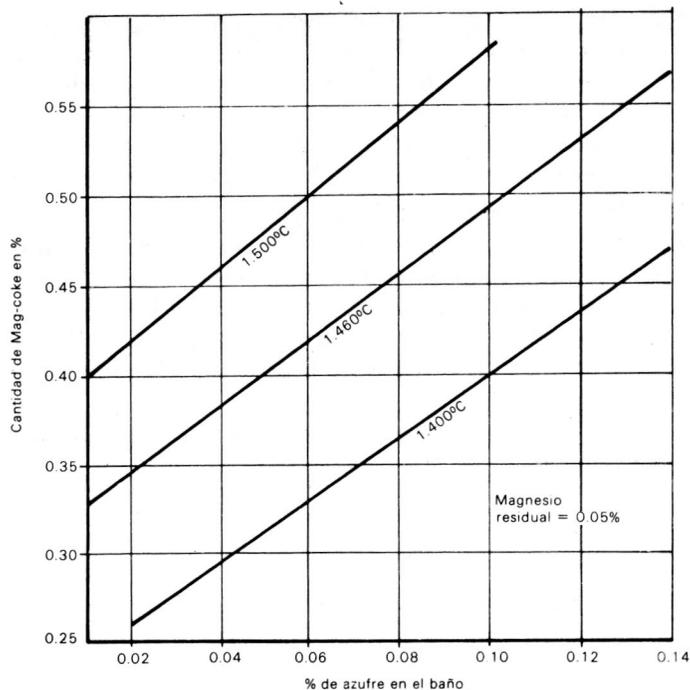


FIGURA 7. Cantidad de Mag-coke requerido para producir hierro nodular a determinada temperatura y cantidad de azufre en el mismo baño.

R = Rendimiento del magnesio en la operación
 (considerado inmediatamente después del trata-
 miento y a temperatura de 1.450°C).

$$R = \frac{0.76 \times \text{reducción en el \% de S} + \% \text{ Mg residual}}{\% \text{ de Mg agregado}}$$

En los ensayos, realizados en la Planta Santa Bár-
 bara (Indumil — Sogamoso), se aplicó el proceso
 Mag-coke (ver fig. 6), con liga magnesio coke al
 45% de Mg. En cada ensayo se procesaron 200 kg.
 de fundición proveniente de un cubilote ácido.

La cantidad de liga Mag-Coke, se calculó utilizan-
 do la Figura 7, para la temperatura de 1.435°C.

Inoculación

Se adicionó en cuchara de ferrosilicio del 75%, en
 cantidades comprendidas entre 0.4% y 1% de la
 carga.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados más importantes de este trabajo
 están resumidos en las tablas, figuras, fotos y en los
 siguientes comentarios:

Se encuentran ciertas limitaciones en la utilización
 del cubilote ácido de diseño convencional para la
 fabricación de fundiciones nodulares de aceptable
 calidad y debido, principalmente, a los siguientes
 factores:

- La temperatura lograda no permite el manejo del
 metal para que se produzca nodulización en
 piezas de espesores menores de 15 m.m.
- Al no poderse incrementar los porcentajes de
 chatarra de acero, los contenidos de fósforo
 en el producto son elevados, lo cual se refleja en
 una disminución de las propiedades.

Existen varias modificaciones que se le podrían hacer al cubilote, pero de acuerdo con estudios económicos sobre los costos y los beneficios de los procesos de fabricación de hierros nodulares en Colombia (que próximamente será publicado), se considera que el cubilote con doble hilera de toberas es una solución óptima.

El cubilote ácido, con doble hilera de toberas y aire balanceado, es una unidad apta para la fabricación de fundiciones nodulares. Los costos de fabricación y operación son extremadamente bajos cuando se les compara con otras unidades de fusión de hierro nodular.

La fabricación de fundiciones ferríticas directamen-

te de colada, aunque disminuye los costos de producción, requiere de un control estricto de las materias primas utilizadas, especialmente en los contenidos de Mn y de Cu.

La elección de los métodos de desulfuración y de nodulización más adecuada depende en todos los casos, del tipo de producción, de los equipos disponibles y de la aplicabilidad de un determinado sistema. El método seleccionado deberá satisfacer dos exigencias básicas, adicionales a los costos de operación:

- Alta eficiencia en la formación de los esferoides.
- Calidad garantizada del producto.

BIBLIOGRAFIA

Libros

Gray Iron Founder's Society. **Manuel des Fontes Movableés**, traduit et adapté de "The Gray Iron Castings Handbook". Ed. Techniques des Industries de la Foundrie. 1965.

Heine R., Loper C., Rosenthal. **Principles of Metal Casting**. Mc. Graw Hill Book Co. 1967.

Gurri Robert, Darken Lawrence. **Physical Chemistry of Metals**. Mc. Graw Hill Publishing Company Inc.

A.F.S. **El Horno de Cubilote y su Operación**. C.E.C.S.A. 1974.

A.S.M. **Metals Handbook**. Vol. 5. Ed. Taylor, Lyman, 1969.

Verhoeven John D. **Fundamentals of Physical Metallurgy**. John Wiley and Sons, Inc., 1975.

Prof. Y. Lakhtin. **Engineering Physical Metallurgy**. Foreign Languages Publishing House, Moscow.

Stephen I. Karsay. **Ductile Iron Production**. Quebec, Iron and Titanium Corporation.

Robert E. Treybal. **Mass Transfer Operations**. 2nd International Students Edition. Koga Kusha, Japan.

Revistas

B.C.I.R.A. **Factors influencing the production of cast iron**. BCIRA, 1970.

British Foundryman. **Production of castings in flake and spheroidal graphite austenitic iron**. May, 1972.

C.T.I.F. **Fabrication de la fonte a graphite spheroidal par les procedes au magnesium**. Janvier, 1975. Fo 96.

C.T.I.F. **Fusion de la fonte au cubilot. Aspect thermique-aspect chimique**. Novembre 1964. Fo 116.

C.T.I.F. **Fonte austenitique avec nickel (cuivre) chrome a graphite lamellaire au spheroidal**. Mars 1971. Fo 52.

Gisserei. **Fontes austenitiques avec graphite spheroidal**. Nº 4, 1966.

Colada, Ciencia y Tecnología. **Algunas observaciones sobre el funcionamiento de cubilotes modernos provistos de perfeccionamientos recientes**. Jean Frchet, Louis Chazé, Centre Technique des industries de la foundrie. Volumen 10, Nº 12, 1977.

Modern Casting. A.F.S. **Divided blast cupola**. Fred Schleg Associate Editor. M. C. September, 1975.

Modern Casting. A.F.S. **New Cupola Technology**. B.J. Davies and A. O. Bain, Canron Limited, Hamilton, Ontario, M. C. September, 1975.

Foundry Tradel Journal. **Switch to twin-blas**. Cupola modification boots production W and T. Avery Limited Progress and Development Report. July 20, 1978.

A.F.S. Transaction. **Cupola Technology - Key to reduce melting energy and cost**. A. B. Draper prof. and J. Gerin Sylvia P. E. Dept. of Industrial and Management System Engineering Center for Air Environments studies. The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, U.S.A.

The British Foundryman. **Cupola Melting in U.K. Ironfoundries**. J. D. Hill, National Smokeless Fuels Limited. October, 1978.