

Estudio del hierro fundido nodular de matriz austenítico

STUDY OF NODULAR CAST IRON OF AUSTENITIC MATRIX

Eusebio Dionicio P.*, **Samuel Rosario F.***, **Oswaldo Gonzales R.***, **Victor Vega G.***, **Luis Orihuela S.***, **Héctor Villacorta A.***, **Victor Falconí R.***

RECIBIDO: 14/11/2013– APROBADO: 20/12/2013

RESUMEN

Las fundiciones nodulares austemperadas poseen propiedades mecánicas más superiores que otros miembros de la familia de las fundiciones nodulares en lo que se refieren a maquinabilidad, resistencia a la tracción, resistencia al desgaste, tenacidad y ductilidad.

En la primera etapa de esta investigación se busca obtener el material base hierro fundido nodular de una composición específica. Con este propósito, el hierro fundido nodular será obtenido en un horno de crisol de 10 kg., empleando la energía calorífica que proviene del quemado del gas de propano (GLP), utilizando aleación de magnesio como nodulizante el cual se introducirá en el fondo del material fundido y como inoculante silicio (ferrosilicio). El metal líquido colado en molde arena en forma de cuña. La evaluación de la microestructura del material fue realizada en la zona de menor grosor y en la zona de mayor grosor, siendo como sigue: a) La zona de la cuña de menor espesor, se aprecia nodulización incipiente y flecos de grafito, con matriz perlítica y presencia de esteadita; b) La zona de la cuña de mayor grosor se aprecia flecos de grafito con escasos nódulos y la matriz es perlítica.

Palabras clave: hierro fundido nodular, hierro dúctil, hierro con grafito esferoidal.

ABSTRACT

Nodular cast iron austempered has superior mechanical properties than other family members of nodular cast iron in relation to properties like machinability, tensile strength, wear resistance, toughness and ductility.

The first stage of this research seeks nodular cast iron base material of a specific composition. For this purpose, the nodular cast iron is obtained in a 10 kg crucible furnace using both heat energy of propane gas (LPG) and magnesium alloy as a catalytic agent which is added at the bottom of the molten material as inoculant silicon (ferrosilicon). The liquid metal mold casting sand is wedge shaped.

The material microstructure evaluation was performed in both thin and thick areas as follows: a) On the wedge area of minor thickness, fringe pelletizing graphite, fringes with pearlite matrix and steatite were detected. b) On the wedge area of major thickness, graphite fringes with some nodules in pearlitic matrix was observed.

Key words: Nodular cast iron, ductile iron, spheroidal graphite iron.

* Docentes del Departamento Académico de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad nacional Mayor de San Marcos. E-mail: iigeo.2010@unmsm.edu.pe.

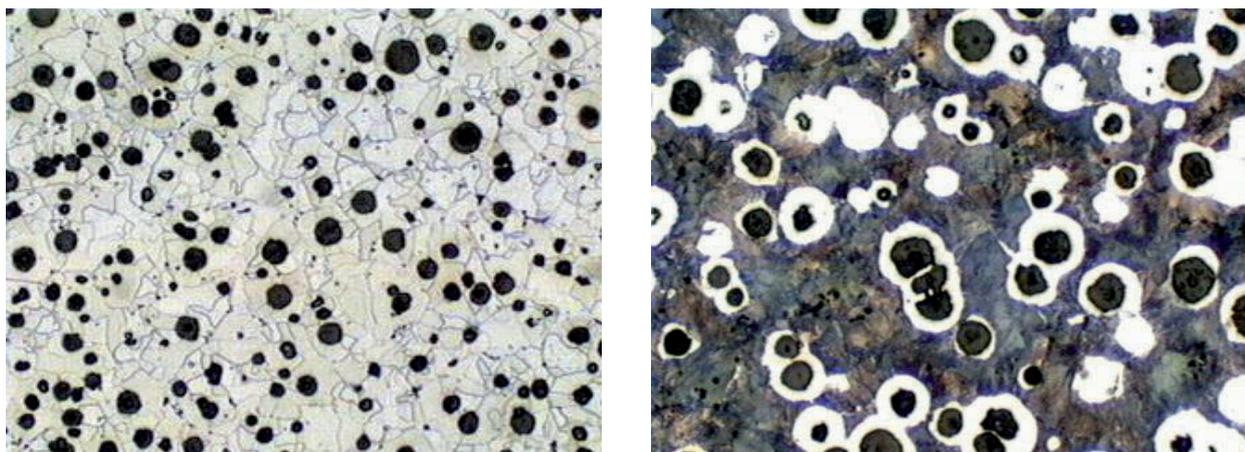


Figura N.º 2. Hierro dúctil, se aprecia los nódulos de carbón esferoidal sin ataque y con ataque químico mostrando la matriz perlítica.

– **Atendiendo al contenido de carbono:**

- a. *Hierros*, cuyo contenido de carbono es muy bajo y su efecto sobre las propiedades ordinarias del hierro puro son despreciables.
- b. *Aceros*, cuyo contenido de carbono es importante. Usualmente se encuentra en el intervalo de 0.1 a 1.5 %, con un valor auxiliar de 2 %.
- c. *Fundiciones*, en las que el contenido de carbono es tal que permite que solidifique parte del líquido en composición eutéctica. El contenido mínimo de carbono es, por tanto, de aproximadamente 4.5 %. El hierro fundido nodular por poseer en su composición contenidos de carbono en el rango de 3.4 a 4.2, está inscrito dentro de esta categoría.

Las fundiciones a su vez pueden subdividirse atendiendo a tres criterios principales.

– **Atendiendo a su ubicación respecto al punto eutéctico,** se dividen en:

- Hipoeutécticas : $2.1 < \% C < 4.3$
- Eutécticas : $\% C = 4.3$
- Hipereutécticas : $4.3 < \% C < 6.7$

– Véase Tabla N.º 1 para conocer su composición química.

- Atendiendo a su fractura se clasifican en: fundición gris, fundición blanca, fundición atruchada, fundición maleable, fundición nodular, también llamada fundición con grafito esferoidal o fundición dúctil (ver Figura N.º 2).

El descubrimiento y posterior desarrollo del hierro fundido nodular, está enmarcado dentro del esfuerzo tecnológico por conseguir mejores propiedades de las fundiciones, el mismo que trajo como consecuencia la obtención y puesta a punto de las fundiciones de gran resistencia; las cuales se definen como fundiciones con resistencias a la tracción superiores a 40 000 psi.

La obtención de fundiciones de alta resistencia es posible siguiendo dos direcciones para el logro de mejores propiedades:

A. Modificando y mejorando la estructura de la base o matriz:

- a. Elijiendo una composición química que dé un análisis final en que se asegure la obtención de una estructura de matriz perlítico (en función del espesor de la pieza), sin otras particulares provisionales o adiciones de elementos especiales.
- b. Elijiendo una composición química tal que la fundición obtenida, tienda a resultar con estructura cementítica; más tratándola en el momento de colada con adiciones particulares, que sin influir en análisis

Tabla N.º 1. Composición química de los hierros fundidos.

Fundición	C	Si	Mn	P	S
Gris (corriente)	2.5 a 4	1.0 a 3.8	0.4 a 1	0.05 a 1	0.05 a 0.25
Gris (alta resistencia)	2.8 a 3.3	1.4 a 2	0.5 a 0.8	0.05 a 0.15	0.05 a 0.12
Blanca	1.8 a 3.2	0.5 a 1.9	0.25 a 0.8	0.05 a 0.2	0.06 a 0.18
Maleable (corazón blanco)	2.5 a 3.0	0.5 a 1.25	0.4 a 0.6	0.05 a 0.1	0.05 a 0.01
Maleable (corazón negro)	2.5 a 2.75	0.5 a 1.2	0.4 a 0.6	0.05 a 0.1	0.05 a 0.01
Nodular (Proc. cerio)	3.6 a 4.3	2.3 a 3.3	0.5 máx	0.05 a 0.1	0.02 máx.
Nodular (Proc. Mg)	3.4 a 4.3	1.8 a 2.8	0.4 máx	0.05 a 0.1	0.02 máx.

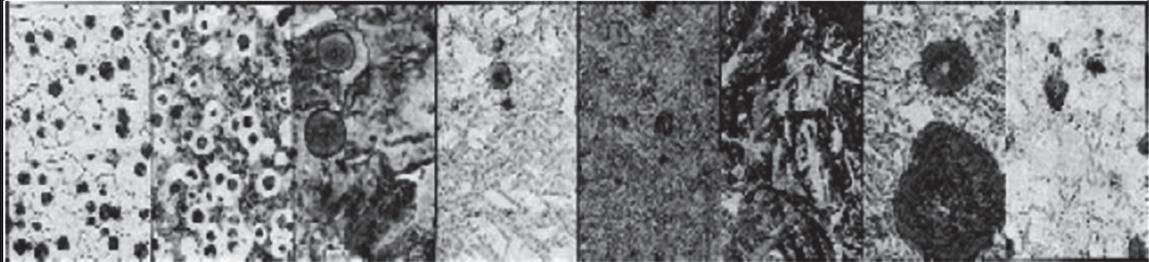
Matriz							
Ferrítico Grado 5	Ferrítico-Perlítico Grado 3	Perlítico Grado 1	Martensítico (con austenita retenida)	Templado martensítico	ADI grado 150	ADI grado 230	Austenítico
60.000 psi (414 MPa)	80.000 psi (552 MPa)	100.000 psi (690 MPa)	NA*	115.000 psi (793 MPa)	150.000 psi (1050 MPa)	230.000 psi (1600 MPa)	45.000 psi (310 MPa)
							
*Resistencia última a la tracción aproximada de 87.000 psi (600 MPa) duro y quebradizo. (Téngase en cuenta que los aumentos son diferentes.)							

Figura N.º 3. Microestructura y esfuerzo a la rotura de varios tipos de hierro dúctil.

final actúan sobre el proceso de cristalización haciendo tomar a la matriz una estructura perlítica.

- c. Añadiendo elementos aleantes especiales, tales como el níquel, cromo, molibdeno, etc, que mejoran las propiedades de la matriz el porcentaje de níquel en la aleación es crítico para conseguir una matriz austenítico. (En la Figura N.º 3 se pueden apreciar las diferentes matrices.)
 - Regulando el proceso de enfriamiento de la pieza colada.
 - Sometiendo la pieza colada a tratamiento térmico especiales.

B. Modificando la forma, dimensiones, cantidad y distribución del grafito libre:

- a. Eligiendo un análisis químico que reduzca el grafito libre.
- b. Elevando la temperatura un centenar de grados, con lo cual las partículas de grafito se hace finas y pequeñas (dúplex).
- c. Añadiendo determinados elementos químicos al caldo, que modifiquen la forma del grafito de lamelar a esferoidal.
- d. Acelerando el proceso de enfriamiento de la pieza, para impedir la formación de gruesas laminillas de grafito.

La fundición nodular contiene un número variable de fases (estructura micrográfica), entre los cuales las más importantes, pero no las únicas, se pueden apreciar en la Tabla N.º 2. Allí también se da la información correspondiente a la estructura cristalina de cada fase. La densidad de los varios tipos de fundiciones depende de la densidad de los microconstituyentes y de la temperatura.

Varios elementos de aleación influyen en la densidad, por ejemplo, incrementando el contenido de Si desde 0 hasta

13.5 %, la densidad de la ferrita se reduce de 7.86 a 7.23 gr/cc; contrariamente la adición de Cr y Mo elevan la densidad de la cementita.

Tabla N.º 2. Matrices presentes en el hierro fundido nodular

Fases	Estructura cristalina	Densidad gr / cm ³
Ferrita	Cúbico de cuerpo centrado - 2 átomos por celda en 0, 0, 0 y ½, ½, ½ parámetro a = 3.16 A	7.86
Cementita	Ortorrómico - 6 átomos por celda parámetros a = 4.51 A, b = 5.08 A c = 6.73 A	7.66
Perlita	Mezcla eutectoide - no constituye una fase propiamente	7.78
Grafito	Hexagonal - 4 átomos por celda parámetros a = 2.46 A, c = 6.7 A	2.25
Martensita	Tetragonal - 2 átomos de Fe por celda además de 0.12 de carbono	7.63
Austenita	Cúbica de caras centradas - 4 átomos por celda	7.84

II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Primera fusión

Composición nominal del Hierro fundido nodular (Tabla N.º 3).

Tabla N.º 3. Carbono equivalente: CE = 4.4

C	3,73
Si	2,72
Mn	0,348
S	0,0257
P	0,0209
Cu	0,0292
r	0,0455
Ni	0,882
Mo	0,167
Sn	0,0049
Mg	0,037

Para determinar la cantidad de magnesio a agregar, entre muchas otras, se propone la fórmula siguiente:

$$Mg_{agregar} = \frac{Mg_{residual} + \frac{3}{4}(S_1 - S_2)}{\eta}$$

Mg residual: Magnesio residual el cual oscila entre 0.05 y 0.08 %, aunque existen otras teorías que afirman que la cantidad óptima está entre 0.03 y 0.06 % otros dan como rango entre 0.03 y 0.12 aclarando que con 0.06 se obtienen las mejores propiedades mecánicas

S1: Azufre antes del tratamiento. Debe ser el menor posible (0.02 %)

S2: Azufre después del tratamiento, generalmente este valor se asume como 0.01.

η: rendimiento de la incorporación del magnesio, el cual depende de la temperatura a la cual se introduce y del contenido del magnesio en la aleación, normalmente 50 %

- Carga en el horno: 8,00 kg
- Arrabio 3,500 kg
- Hierro fundido (retornos) 5,300 kg
- Níquel electrolítico 100,00 gramos
- Ferro silicio 120,00 gramos
- Nodulizante 350,00 gramos

Fusión: Cargar el níquel y calentar hasta que este rojo y pastoso y 1,00 kg de arrabio, luego ir agregando el arrabio y el hierro fundido hasta la fusión total. Agregar caliza como fundente 80,00 gr al inicio de la fusión.

Sobrecalentar hasta 1400 °C, escoriar y nodulizar antes de colar. Colar lo más rápido posible (Figuras N.º 4 y 5).

2.2 Segunda fusión

Resolviendo el problema de la temperatura de fusión, la combustión fue mejorada con aire enriquecido con oxígeno. Ajustando la composición. (Tabla N.º 4).

Tabla N.º 4. Temperatura de sobrecalentamiento 1450 °C

Análisis químico	C	Si	Mn	S	P	Mg
Análisis requerido	3,5- 3,8	2,25-2,50	0,39- 0,40	0,02	0,06	0,04
Análisis obtenido	3,25	1,90	0,82	0,015	0,026	0,05

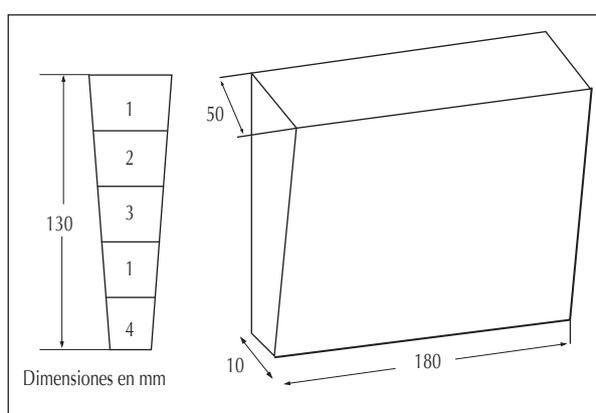

Figura N.º 4. Muestra tipo cuña usado para el vaciado del metal líquido.

Figura N.º 5. Cuña de hierro fundido obtenida de la primera colada y donde se aprecia las muestras cortadas para el análisis metalográfico.

Propiedades mecánicas del material

Medición de la dureza

Zona de la cuña de menor grosor (5), promedio = 93 HRB

Zona de la cuña de mayor grosor (1), promedio = 90 HRB

2.3 Análisis metalográfico

A. Primera fundición

La temperatura después de la nodulización bajó rápidamente hasta cerca de 1200 °C lo cual no permitió la nodulización completa (Figuras N.º 6, 7, 8 y 9).

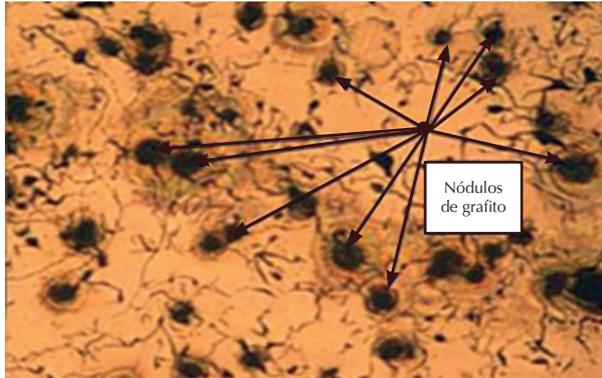


Figura N.º 6. Micrografía a 100X sin ataque de la cuña de menor espesor. Se aprecia nodulización incipiente y flecos de grafito.

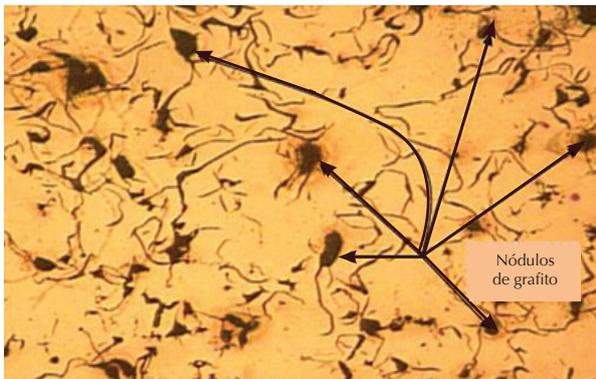


Figura N.º 7. Micrografía a 100X sin ataque de la cuña de mayor espesor. Se aprecia flecos de grafito, escasos nódulos.



Figura N.º 8. Micrografía a 500X con ataque nital 2%. Se aprecia una matriz perlítica. Presencia de esteadita.

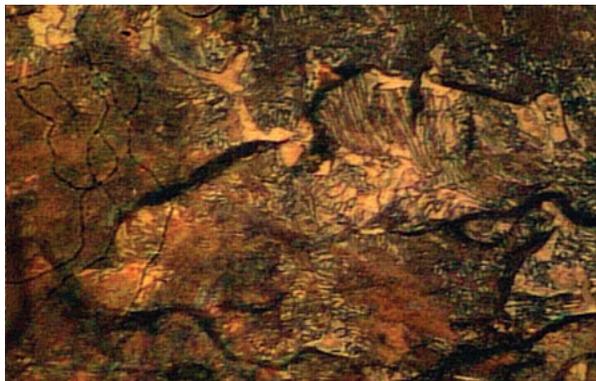


Figura N.º 9. Micrografía a 500X con ataque nital 2%. Se aprecia una matriz perlítica.

B. Segunda fundición

El problema de la temperatura de nodulización fue corregido lográndose 1450 °C que permite una mejor reacción con el nodulizante a base de magnesio aun cuando la temperatura desciende hasta cerca de 1300 °C lo que permite mejor fluidez. Véase figuras N.º 10 y 11.

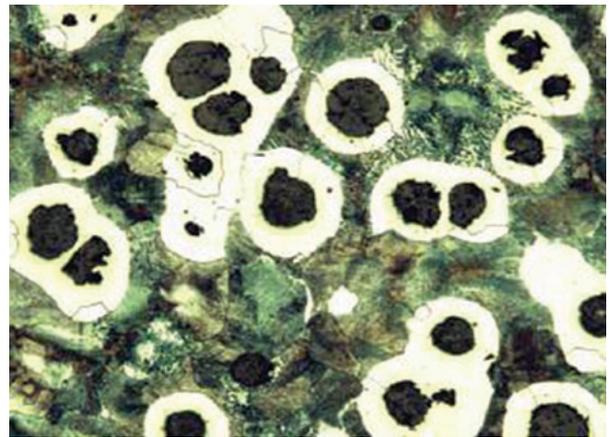
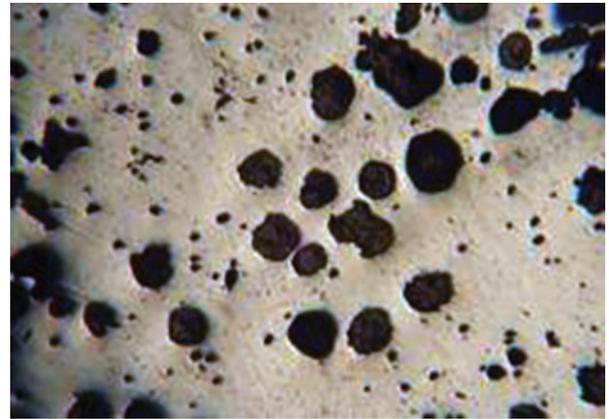


Figura N.º 10. Micrografía a 100X sin ataque de la cuña de menor espesor, se aprecia nodulización y grafito en diferentes formas y con ataque con Nital al 2% se aprecia la matriz ferrita-perlita.

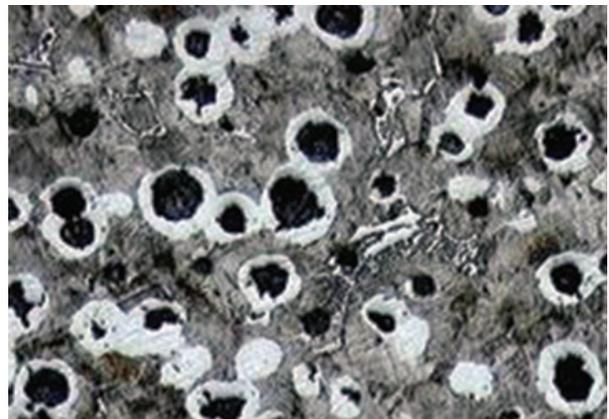


Figura N.º 11. Micrografía a 200X ataque con nital al 2%. Nódulo de grafito rodeado de ferrita en matriz perlítica, con la presencia de esteadita(hay que controlar el contenido de fósforo).

III. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La evaluación del ensayo microscópico muestra que el tratamiento con el nodulizante a base de magnesio desarrolla el tipo de grafito nodular (Figuras N.ºs 6, 10, 11).

La presencia de grafito laminar en la primera fundición después de la nodulización indica que:

1. Posiblemente la baja temperatura del metal menor de 1400°C no ha permitido la acción del magnesio y su volatilización, no dando lugar a la inoculación posterior.
2. La baja temperatura de nodulización ha hecho que el metal solidifique tempranamente no dando el tiempo necesario para que la nodulización ocurra y se uniformice en la matriz, es decir bajo gradiente de temperatura, permitiendo que mayor proporción de magnesio residual (> 0,06%) esté presente. Se corrobora con el análisis final.
3. La incipiente nodulización en la sección de mayor espesor ha ocurrido por no haber quedado la cantidad de magnesio suficiente en su volatilización transcurriendo el metal.
4. La presencia de Esteadita indica que el contenido de fósforo está por encima del límite máximo permisible para este tipo de material (< 0,07%) lo cual dificulta la nodulización. Hay que controlar mejor la materia prima.
5. Habría que evaluar la presencia de elementos residuales que dificultan la nodulización como el Pb, Sn, As, Bi, Sb, Cu entre otros.
6. La baja temperatura es posible que haya ocurrido con el material que contenía el nodulizante. Para mejorar habrá que utilizar otra técnica, por ejemplo el método sándwich.

7. Mejorando el proceso de fusión en el horno de crisol con la quema de combustible gas GLP y aire enriquecido con oxígeno se logra mayor temperatura que permite el tratamiento de nodulización más eficiente.

IV. CONCLUSIONES

1. Por los resultados del análisis metalográfico se observa que si se puede obtener nódulos de grafito.
2. Se debe hacer un control minucioso de la materia prima en la presencia de elementos que no facilite la nodulización.
3. Se debe alcanzar temperatura > a los 1400 °C para asegurar que en momento de la nodulización el gradiente no sea tan corto que permita alcanzar el estado sólido antes de efectuar bien la nodulización.
4. Desarrollar la inoculación inmediata a la nodulización para estabilizar los nódulos.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. C. CHIRINOS, *Estudio sobre el fierro fundido nodular* p.6, tesis, TS/230 C 61 2000, 1989, UNMSM
2. M.P. DE ANDREA (1962). *El diagrama hierro-carbono y los fundamentos de los tratamientos térmicos del acero*. Madrid, Ed. Montecorvo, p. 173,
3. GARCÍA, J.A *et al. Experiencia en la Manufactura de Hierro Nodular Austemperizado sin y con Carbono (ADI-CADI) en la UNAM*. Departamento de Ingeniería Metalúrgica, UNAM, México. p. 3.
4. SOREMELALR DUCTILE IRON DATA for design Engineerings, Section II, pp. 2-10, Ed. Río Tinto Iron & Titanium Inc. Canada, 1990.