

Efecto del conteo de nódulos en la resistencia a la tracción de los hierros dúctiles austemperados.

C. J. Diez Cicero, G. R. Fernández López, U. Ordóñez Hernández*
F. Mondelo **, E. Fraga Guerra *** .

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría. Facultad de Ingeniería Mecánica.
Calle 127 s/n. CUJAE. Marianao 15. Ciudad de la Habana. Cuba.

Departamento Gráfica de Ingeniería. Teléfono: 261 3036

*Departamento de Tecnología en la Construcción de Maquinarias.

Teléfono: (537) 27 1644. Fax: (537) 27 1208

**UDM "Antillana de Acero". Filial Facultad de Mecánica.

Teléfono 682 8768 al 69 y 52 57 21

***Departamento de Matemática. CUJAE. Teléfono: 260 4041 al 69 Ext. 63

Email: cdiez@mecanica.cujae.edu.cu .

(Entregado el 10 de Septiembre de 2003, aprobado el 21 de Noviembre de 2003)

Resumen.

Entre los materiales metálicos de mayor demanda, la producción de hierro con grafito nódular ocupa uno de los lugares más importantes entre los hierros fundidos de alta resistencia y con la introducción del tratamiento térmico de austemperado, aplicado a estas fundiciones, se da lugar a una nueva familia de materiales, caracterizados por su alta resistencia mecánica y elevada tenacidad, que mantienen la economía y facilidad de producción de las fundiciones nodulares.

Este trabajo, hace una valoración del comportamiento de hierros nodulares, con diferentes conteos de nódulos, a los que les fue aplicado el tratamiento de austemperado y posteriormente se les sometió a ensayos de propiedades mecánicas de tracción.

Con los resultados obtenidos, se hace un análisis de la influencia del conteo de nódulos en dichas propiedades, así como también, de la interrelación del conteo de nódulos con las variables de tratamiento térmico utilizadas en las muestras ensayadas.

Palabras claves: Hierro nódular, conteo de nódulos, austemperado.

1. Introducción.

El hierro dúctil austemperado (ADI) es un material que tiene potencial en aplicaciones donde la resistencia, la tenacidad, la ductilidad, la resistencia al desgaste y la aplicabilidad son importantes. En consecuencia es un material natural a considerar en la construcción de equipos, automóviles y en la industria minera. Producido adecuadamente el ADI posee una microestructura única consistente en una matriz de austenita con alto carbono (térmicamente estabilizada) conjuntamente con ferrita o una mezcla de ferrita y carburos dependiendo de la temperatura de austemperado. La microestructura única tiene propiedades mecánicas que son muy superiores, tanto la resistencia como la ductilidad, que la de los hierros dúctiles con matrices de la variedad cúbicas centradas en el cuerpo (ccc); por ejemplo, ferrita, perlita y martensita revenida.

Ciclo de austemperado convencional.

El austemperado convencional se realiza con la austenización de la muestra a una temperatura por encima de la crítica superior y su posterior temple en un baño de sales, a una temperatura en el rango de 275-400 °C[2], durante 1 ó 2 horas, tiempo suficiente para permitir la transformación completa a producto ausferrítico, una mezcla de dos fases, austenita con alto carbono (aproximadamente 2% de carbono) y finalmente ferrita dispersada.

La Figura 1 ilustra el ciclo térmico desarrollado en el proceso de austemperado.

Como puede verse en la figura 1, enfriar rápidamente desde la temperatura de austenización hasta la temperatura ambiente daría lugar a una estructura martensítica frágil cuando las probetas hayan pasado a través de los puntos M_s y M_f (comienzo y final de

transformación martensítica). En lugar de ello el paso del austemperado da lugar a la creación de un producto austenítico mucho más dúctil y tenaz, el cual se hace estable a la temperatura ambiente y por debajo de ella.

La cinética de transformación ausferrítica, esta determinada mayormente por la diferencia en el contenido de carbono, ΔC , entre la matriz austenítica, C_γ^o , y la austenita metaestable de alto carbono en el producto ausferrítico, C_γ . Esto es ilustrado por el diagrama de fase esquemático, y la curva de energía libre.

La transformación a ausferrita ocurre por la nucleación de la ferrita en los nódulos o próxima a ellos, de grafito (en los primeros volúmenes en solidificar) y progresa a través de la matriz terminando en los últimos volúmenes en solidificar. El completamiento de la transformación ausferrítica depende de las temperaturas de austenización y de temple isotérmico seleccionadas, como también de la composición de la aleación (especialmente en los hierros altamente aleados y en las fundiciones de secciones más gruesas).

enfriamiento después del austemperado. La presencia de la martensita en estas regiones últimas en solidificar, reduce dramáticamente la ductilidad.

Como se explicó anteriormente, el proceso de transformación de la ausferrita, ocurre por la nucleación de la ferrita en los nódulos o próxima a ellos, de grafito (en los primeros volúmenes que solidifican), y progresa a través de la matriz concluyendo en los últimos volúmenes en solidificar. De lo anterior se puede suponer, que aumentando el conteo de nódulos, se incrementan los centros de nucleación, y con ello se obtiene una matriz con una distribución más uniforme de la austenita, que a su vez responde con más efectividad al tratamiento térmico, y por supuesto con mejores propiedades.

Es bien conocido que el austemperado requiere del uso de hierros nodulares de alta calidad, porque algunos de los defectos generados durante el proceso de fundición serán magnificados por el tratamiento térmico. El conteo de nódulos, brinda una medida de la calidad del hierro utilizado.

El objetivo del presente trabajo, es el de caracterizar el comportamiento mecánico de las fundiciones nodulares austemperadas, atendiendo al conteo de nódulos, y al tamaño y forma de los mismos en la microestructura de estos hierros nodulares austemperados.

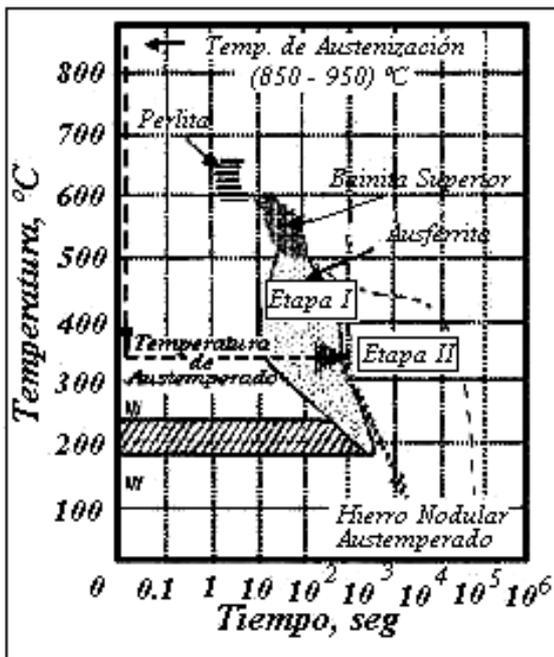


Figura 1. Ilustración de la transformación Ausferrítica.

Algunas de estas transformaciones no van a completarse en los últimos volúmenes que solidifican, excesivamente segregados, una gran parte del contenido de carbono de la matriz en esos sitios es más bien alto, debido a la segregación de los elementos de aleación empleados, de tal modo que ello da lugar a un valor más pequeño de ΔC . En estas instancias, el contenido de carbono en la matriz de austenita no es lo suficientemente alto como para estabilizar esa fase, dando lugar a la formación de martensita, por el

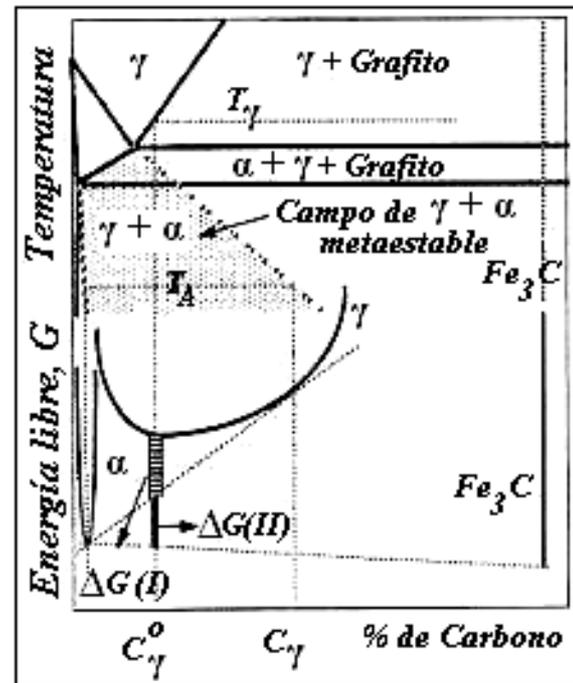


Figura 2. Gráfico Fe-C-Si y curvas de energía libre ilustrando la relación fundamental de la γ metaestable con la fase $\alpha + \gamma$ y las fuerzas direccionales para las etapas I y II en T_A (temperatura de austemperado).

2. Parte experimental.

Las probetas para los ensayos de tracción, fueron elaboradas a partir de bloques en Y de fundición nódular. Para el análisis microestructural, fueron tomadas las muestras de los extremos de las barras obtenidas de los bloques en Y seccionados. Fig. 3. Las aleaciones utilizadas mostraron conteos de 140 nódulos la aleación A y 240 nódulos la aleación B.

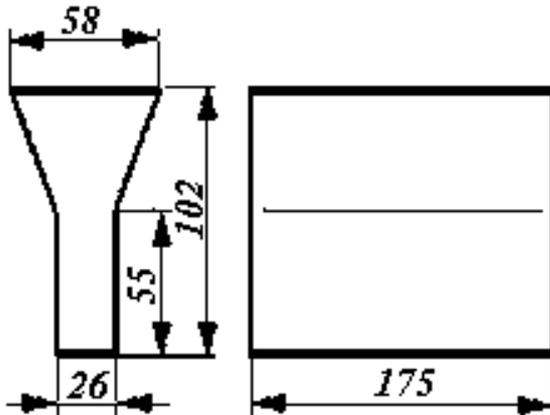


Figura 3. Bloque en Y

Tabla 1. Composición química de las muestras ensayadas

	A	B
C	3.66	3.72
Si	2.49	2.52
Mn	0.03	0.03
P	0.021	0.020
S	0.014	0.016
Cr	0.06	0.05
Ni	0.044	0.044
Mo	0.24	0.24
Cu	0.03	.03
Mg	0.062	0.060
Ti	0.027	0.026
Al	0.010	0.014
Pb	0.004	0.004
Sn	0.00	0.00
V	0.032	0.033

En el tratamiento térmico de austenización, se empleó un horno de cámara, en el cual fue colocada una cubeta con sal común, donde fueron sumergidas las probetas, con el objeto de minimizar la descarburación de las mismas a las temperaturas de 850 °C y 925°C por espacio de una hora.

El austemperado se realizó en un horno eléctrico vertical de pozo profundo, y las probetas se sumergieron

en un baño de sales, con una mezcla a partes iguales de nitrato de sodio, NaNO_2 , y nitrato de potasio, KNO_3 , y tratadas a temperaturas de 310 °C y 370 °C indistintamente, por intervalos de tiempo de 30 minutos y 1 hora.

Las combinaciones entre las temperaturas de austenización, T_y , temperatura de austemperado T_A y los tiempos de austemperado t_A , están dados en la tabla 2 para ambas aleaciones. Después de austemperadas, las probetas fueron enfriadas en agua.

Las muestras utilizadas en la metalografía, fueron preparadas de la forma convencional, el ataque fue hecho con nital al 2%. Para determinar el contenido de austenita retenida fue empleado un programa creado en el Departamento de Ciencia de los Materiales y Metalurgia de la Universidad de Cambridge, consistente en un modelo de red neural dentro de una estructura Bayesian que fue creado usando datos publicados para modelar el contenido de austenita retenida. Las probetas empleadas en los ensayos de tracción, fueron hechas por triplicado, respondiendo a un plan de experimentos del tipo factorial 2^4 con 2 replicas.

Las probetas fueron elaboradas según las indicaciones de la norma ASTM designación E8M-93 para ensayos de tracción (Fig. 4). La sección calibrada de las probetas fue rectificada con el objetivo de eliminar las marcas indeseables de maquinado.

Los ensayos fueron realizadas en una máquina universal para ensayos de tracción, y los datos registrados para cada una de las probetas incluyen: el esfuerzo de fluencia, σ_f , el esfuerzo máximo, $\sigma_{m\acute{a}x}$, el valor de la elongación en %, δ , y el valor de la reducción en área en %.

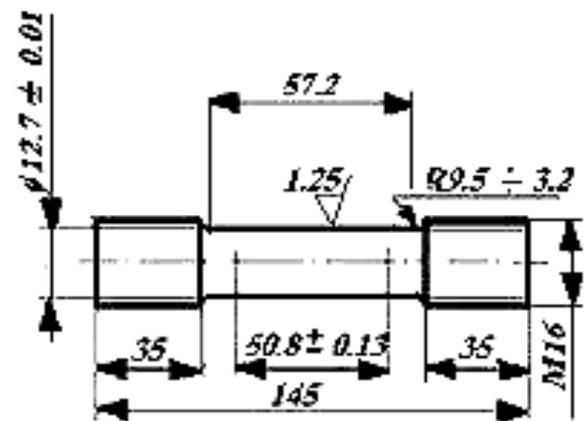


Figura 4. Probeta de Tracción. ASTM designación E8M93.

3. Análisis de los resultados.

Los exámenes metalográficos practicados en las muestras del hierro nódular utilizadas en el tratamiento térmico de austemperado, exhiben una microestructura

de colada con fundición gris ferrítica, con una morfología del grafito esferoidal (regular) en correspondencia con la norma ASTM, forma VI-V, con un grado de Nodularidad del grafito de más del 90%. Las características particulares de ambas estructuras son relacionadas a continuación:

Aleación A.

Conteo de nódulos	140 nódulos/mm ²
Área ocupada por el grafito	más del 5% y hasta el 8%
D _{máx} de los nódulos	100 MK

Aleación B

Conteo de nódulos	240 nódulos/mm ²
Área ocupada por el grafito	del 3% al 5%
D _{máx} de los nódulos	de 40 a 60 MK

Los análisis metalográficos obtenidos de todas las muestras tratadas térmicamente, evidencian una estructura predominante de tipo bainítica, con variación en la finura y geometría de los listones de ferrita en función de las temperaturas de temple isotérmico empleadas, 370 °C y 315 °C, variando las zonas de austenita en magnitud y dispersión según las muestras.

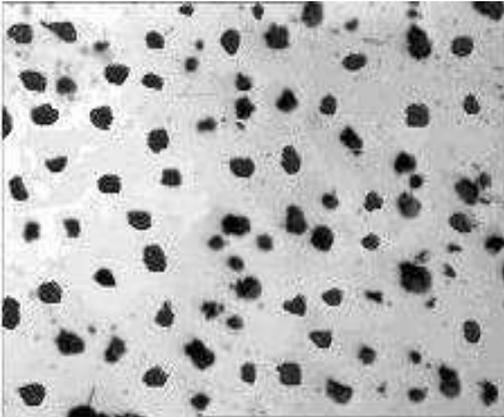


Figura 5. a) Muestra A, con 140 nódulos/mm² 100X

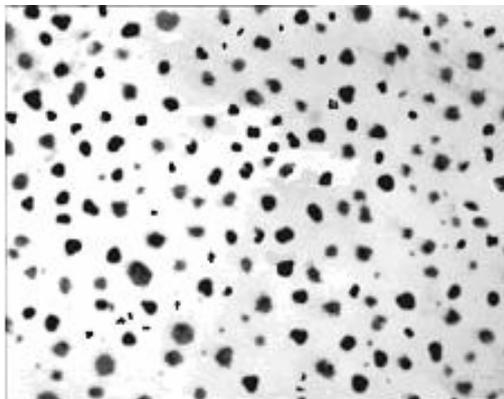


Figura 5. b) Muestra B, con 240 nódulos/mm². 100X

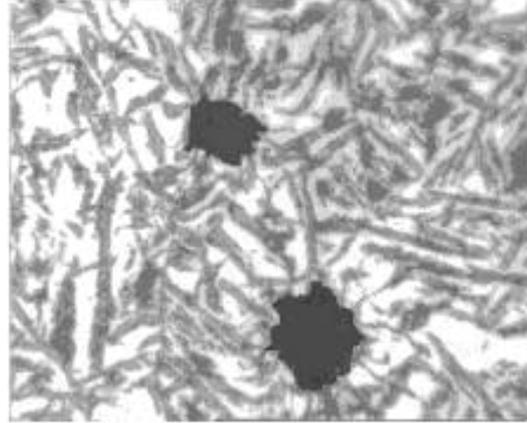


Figura. 6. Muestra B, austenizada a 925 °C con un temple isotérmico a 370 °C durante 30 minutos. Atacada con Nital 400X

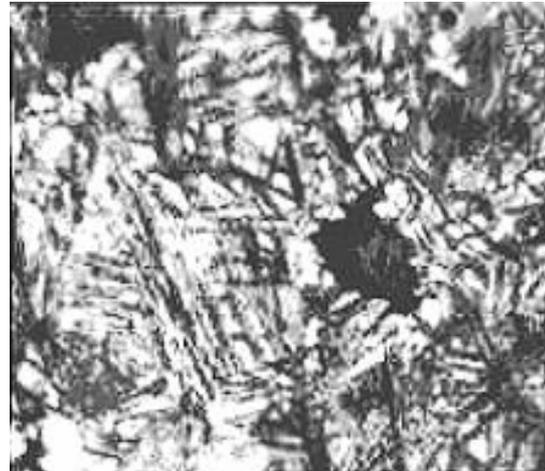


Figura. 7. Muestra B, austenizada a 925 °C con un temple isotérmico a 310°C durante 30 minutos. Atacada con Nital. 400X

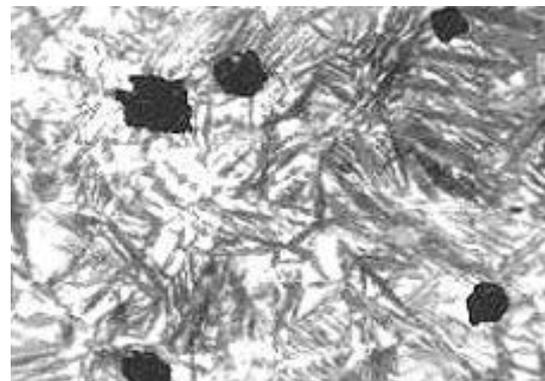


Figura. 9. Muestra austenizada a 850 °C y con un temple isotérmico a 370 °C. Atacada con Nital 400X.

4. Resistencia Máxima.

En la Fig. 10 se muestra la influencia de los diferentes factores en la resistencia máxima del material.

En la misma puede observarse el efecto positivo del conteo de nódulos en el incremento de la resistencia máxima.

Con vistas a determinar las mejores variantes tomando como referencia el conteo de nódulos de

conjunto con las diferentes variables de tratamiento térmico, mostramos los gráficos de las figuras 11, 12 y 13, donde se muestran las superficies de respuesta obtenidas para la resistencia máxima en función del conteo de nódulos y de las variables de tratamiento térmico (temperatura de austenización, temperatura de temple isotérmico y tiempo de mantenimiento a la temperatura de temple isotérmico).

Tabla 2. Resultados obtenidos.

Variante	T _{AUST} °C	T _{TEMP} °C	T _{MANT} (min)	Nód/mm ²	Aust. Ret.	R _{MÁX} MPa	R _{FL} MPa	EI %	RA %
A1_P	925	370	60	140	0,36	1085,667	852,667	6,79	7,59
B1_P	925	370	60	240	0,32	1183,000	871,333	6,54	8,15
A2_P	925	370	30	140	0,34	1036,333	804,000	4,80	6,15
B2_P	925	370	30	240	0,3	1085,667	854,000	6,22	8,02
A3_P	925	310	60	140	0,27	1381,333	914,333	4,61	5,12
B3_P	925	310	60	240	0,22	1402,333	931,333	4,82	5,27
A4_P	925	310	30	140	0,24	1284,000	912,000	4,59	5,09
B4_P	925	310	30	240	0,2	1358,667	926,000	4,67	5,20
A5_P	850	370	60	140	0,22	1155,333	906,000	9,08	8,01
B5_P	850	370	60	240	0,2	1230,000	917,000	9,33	8,49
A6_P	850	370	30	140	0,25	1084,000	843,667	9,07	8,49
B6_P	850	370	30	240	0,23	1120,333	904,667	9,33	8,61
A7_P	850	310	60	140	0,12	1324,000	1040,667	2,64	1,97
B7_P	850	310	60	240	0,1	1438,333	1076,000	2,99	2,10
A8_P	850	310	30	140	0,13	1316,667	987,000	2,57	1,87
B8_P	850	310	30	240	0,12	1383,333	1021,333	2,80	2,12

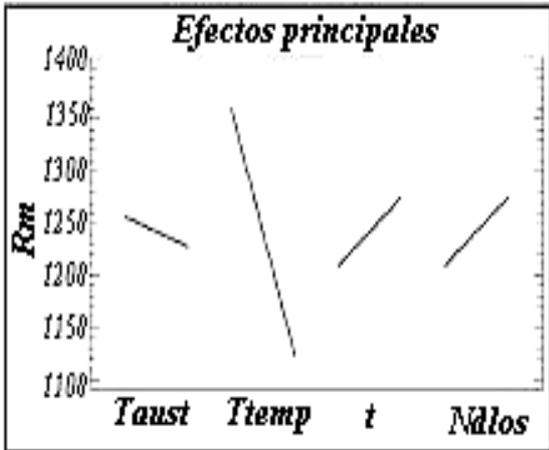


Figura 10. Efectos principales de los factores en la Resistencia Máxima.

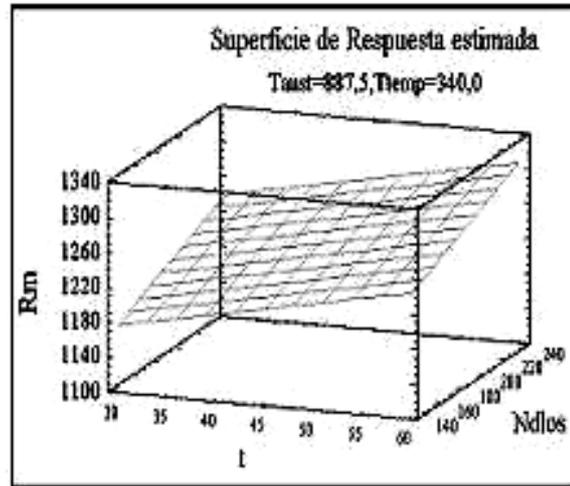


Figura. 13. Superficie de respuesta estimada en función del tiempo y del conteo de nódulos.

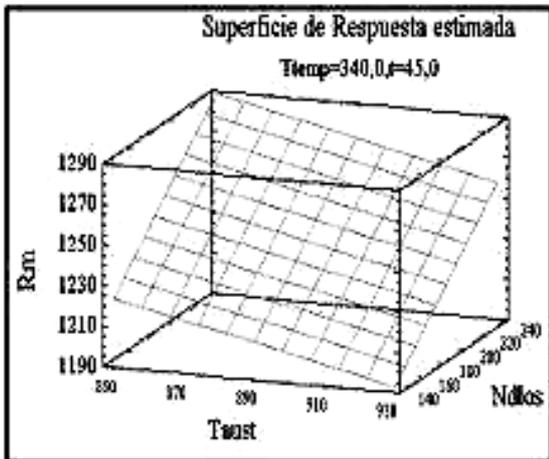


Figura. 11. Superficie de respuesta estimada en función de la Taust y del conteo de nódulos.

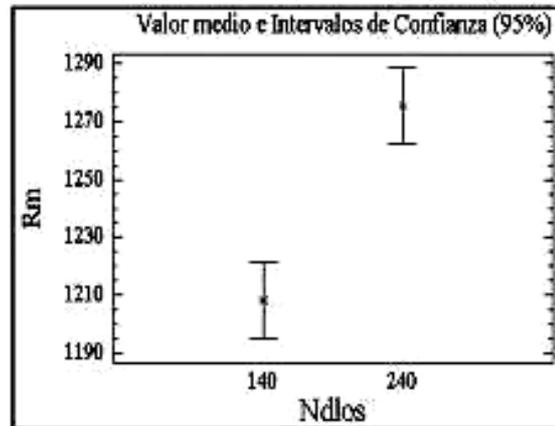


Figura. 14. Gráfico con los intervalos de confianza para la Rm en función del conteo de nódulos.

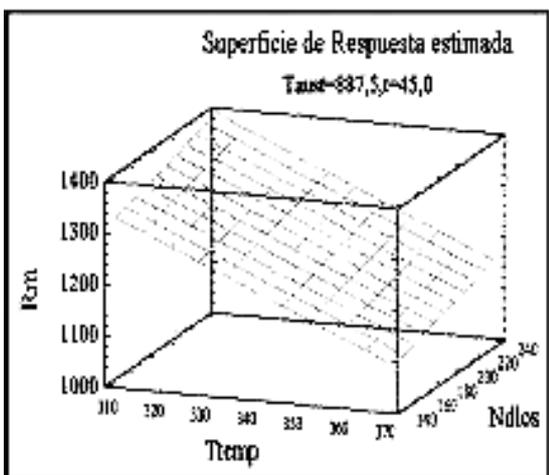


Figura. 12. Superficie de respuesta estimada en función de la Temp y del conteo de nódulos.

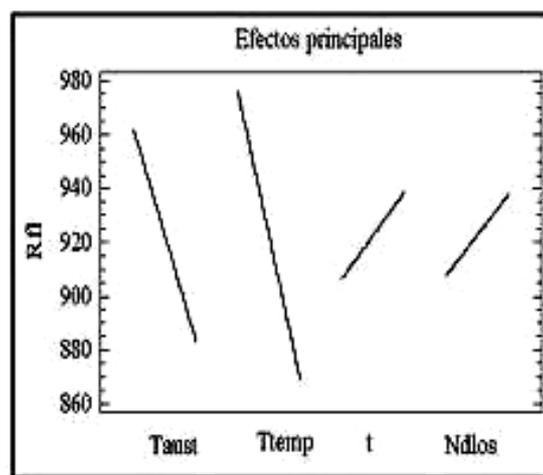


Figura. 15. Efectos principales de los factores en la Fluencia.

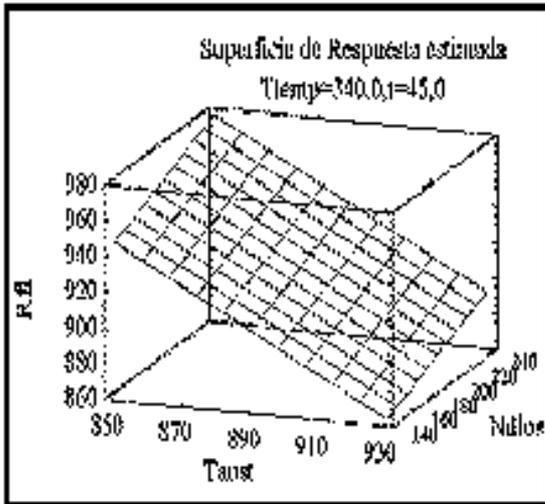


Figura. 16. Superficie de respuesta estimada en función de la Taust y del conteo de nódulos.

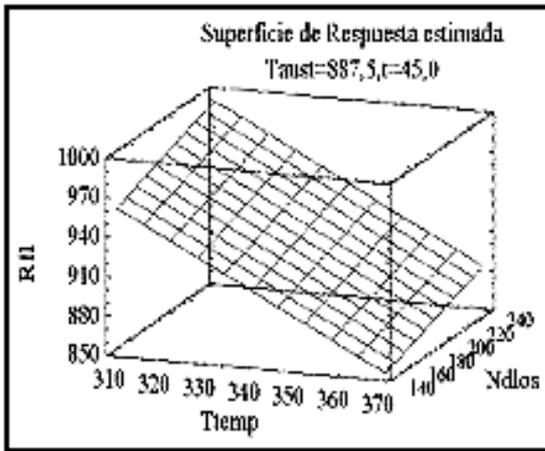


Figura. 17. Superficie de respuesta estimada en función de la Taust y del conteo de nódulos

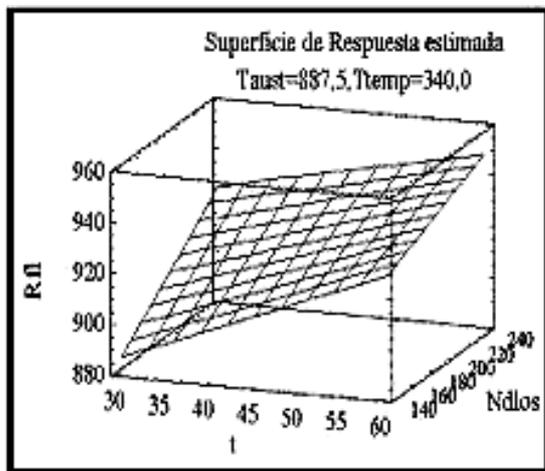


Figura. 18. Superficie de respuesta estimada en función de la Ttemp y el conteo de nódulos.

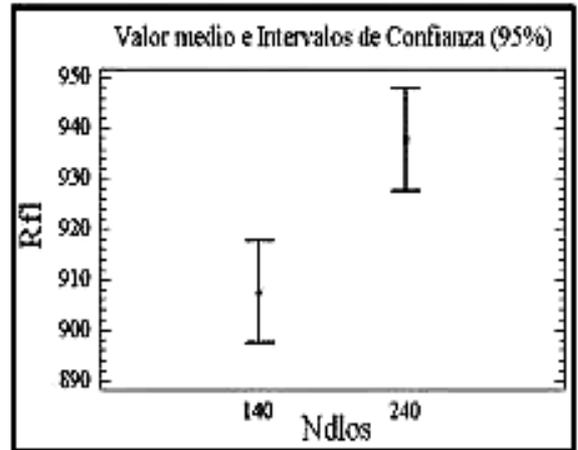


Figura. 19. Gráfico con los intervalos de confianza para la Rf en función del conteo de nódulos.

Nota:
Ndlas—(Nód/mm²), T—(°C), Rm—(MPa)

6. Elongación.

Al igual que en los casos anteriores se puede apreciar en la Fig. 20 que un incremento de conteo de nódulos implica un incremento de la ductilidad del material, de manifiesto con el incremento de la elongación.

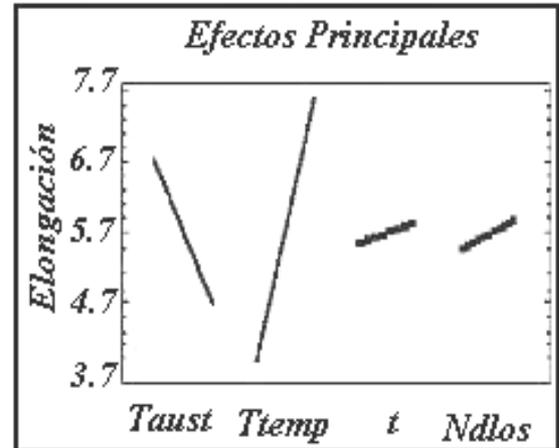


Figura. 20. Efectos principales de los factores sen la Elongación.

También en las figuras 21 a la 23 donde se aprecian las superficies de respuestas para la elongación, en función del conteo de nódulos y de las variables de tratamiento térmico, se aprecia como aumenta la elongación en la medida se incrementa el conteo de nódulos.

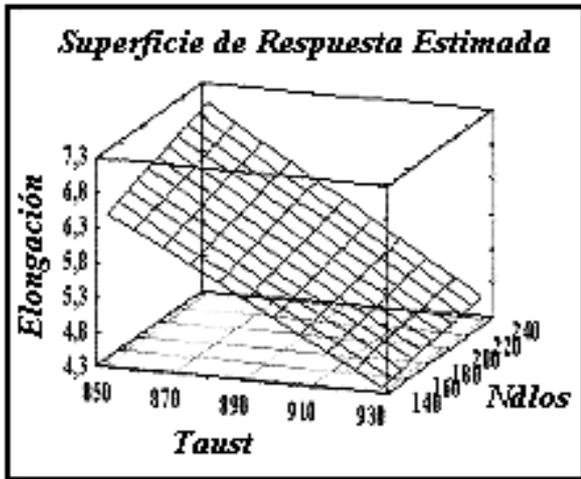


Figura 21. Superficie de respuesta estimada en función de la Taust y el conteo de nódulos

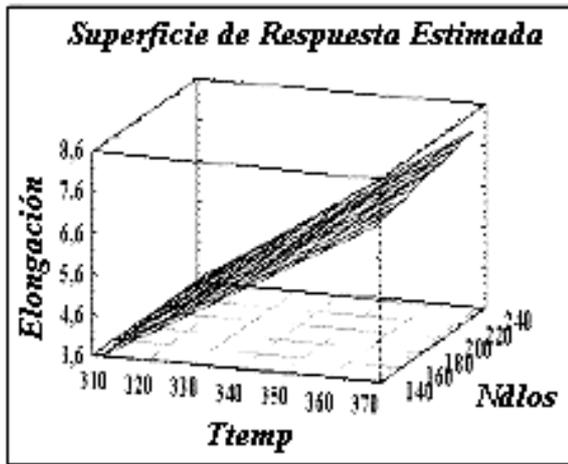


Figura 22. Superficie de respuesta estimada en función de la Ttemp y el conteo de nódulos.

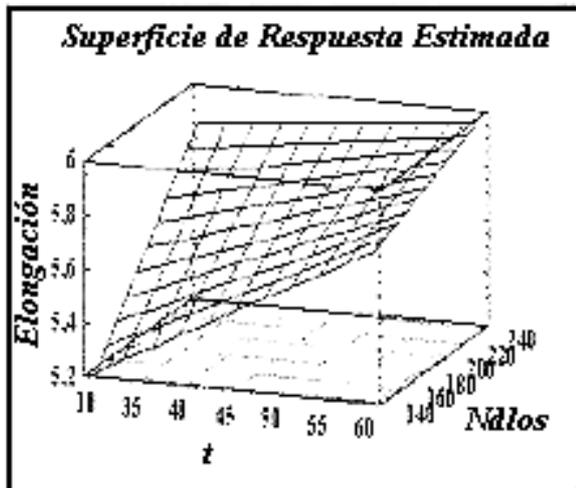


Figura 23. Superficie de respuesta estimada en función del tiempo de austemperado y el conteo de nódulos.

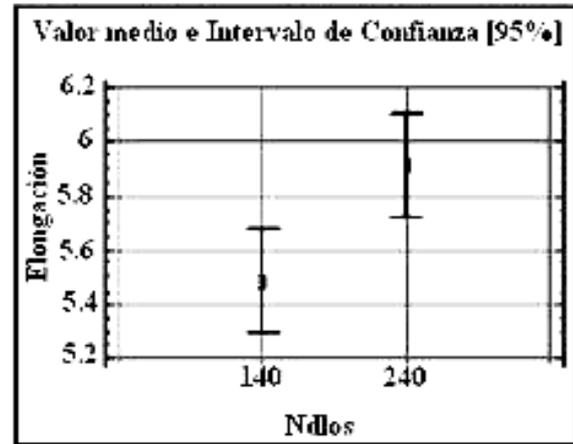


Figura 24. Gráfico con los intervalos de confianza ara la elongación.

Nota:

Ndlos—(Nód/mm²), T—(°C), Elongación—(mm)

7. Conclusiones.

Puede observarse en los resultados de los experimentos, un rol significativo del conteo de nódulos en la resistencia máxima, la fluencia y la ductilidad del material, quedando claro en todos los casos que un incremento del conteo de nódulos favorece las propiedades a la tracción del hierro dúctil austemperado., Esto se debe a que:

- Mientras mayor sea el volumen que ocupen los nódulos tanto más bajas serán las propiedades de la fundición.
- Un incremento del conteo de nódulos por mm², implica una reducción en el tamaño de los nódulos de grafito, lo cual mejora la resistencia del material.
- Las prácticas de inoculación usadas para fomentar el conteo de nódulos, hacen los nódulos más esféricos. Así que los altos conteos de nódulos están asociados a una nodularidad mejorada.
- A igualdad de volumen de los huecos (es decir de la cantidad de grafito), las propiedades dependerán de su tamaño, de su forma, de su distribución y la reducción del tamaño del grafito da lugar a una mejoría en su morfología, por la reducción de las imperfecciones e irregularidades en el nódulo, eliminando del mismo los posibles focos de concentración de tensiones e inicio de grietas.

8. Bibliografía.

1. Rundman K., Department of Metalurgical an Materials Engineering Michigan Technological University: Austempered Ductile Iron:

- Microstructure and Mechanical Properties. Helsinki University of Technology, May 28 (1997).
Tensile Properties in Austempered Ductile Iron". AFS Transactions, vol. 95, pags 765-772 (1987).
3. T. N. Rouns, and K. B. Rundman "Constitution of Austempered Ductile Iron and Kinetics of Austempering", AFS Transactions, vol. 95, pags 851-874, (1987).
 4. K. L. Hayrynen, D. J. Moore, K. B. Rundman, "Tensile Properties and Microestructure of Clean Austempered Ductile Iron", AFS Transactions, vol. 90, pags 471- 476, (1990).
 5. K. L. Hayrynen, D. J. Moore, K. B. Rundman, "More about the Tensile Properties and Fatigue "Properties of Relatively Pure ADI", AFS Transactions, vol. 93, pags 127-130, (1990).
 6. Tukahara S., Yamada S., Funatani K.: Effects of the Ferrite Around Graphite on Ductility of Austempered Ductile Iron. Kanto Gakuin
 2. D. J. Moore, T. N. Rouns, and K. B. Rundman, "The Relationship Between Microstructure and University, Kanazawa-Ku, Yokohama, Japan; IMST Inst., Mizuho-ku, Nagoya, Japan. 10 de octubre del 2000
 7. Diez C., Goyos L., Ordoñez U., El índice de endurecimiento en las fundiciones nodulares austemperadas. Memorias del II Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica . La Habana. Septiembre de 1997.
 8. Goyos L., Castañeda R.,Wettinck E., Valera R., Moors M.: Comportamiento del hierro nodular austemperizado en condiciones de corrosión y desgaste. Revista Ingeniería Mecánica. Cuba. Vol. 2 / Número 2, Abril / Junio 1999
 9. Ductile Iron Society: Ductile Iron Data for Design Engineers. Section IV. Austempered Ductile Iron. (August 1998).

Effect of nodules count in the tensile strength of austempered ductile irons.

Abstract.

At the present, iron production with nodular graphite, occupies one of the most important places in the production of metallic materials high resistance. The introduction of the austempered heat treatment, gives rise to a new family of materials, characterized by its high mechanical resistance and elevated tenacity, this family maintain the economy and facility of production of the smeltings nodules. This work, makes a valuation of the nodules iron behavior, with different number of nodules, to which the austempered treatment was applied, in order to test mechanical properties. With the obtained results, an analysis is carried out to control the influence of the count of nodules in these properties, as well as, the interrelation of the count of nodules with the used heat treatment variables in the samples.

Key words: nódular Iron, count of nodules, austempered.