

# Comportamiento del hierro nodular austemperizado en condiciones de corrosión y desgaste

**L. Goyos Pérez\*, R. Castañeda Segarra\*, E. Wettinck\*\*, R. Valera\*, M. Moors\*\***

\*Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría. Facultad de Ingeniería Mecánica.  
Departamento de Tecnología en la Construcción de Maquinarias. Grupo de materiales.  
Calle 127 s/n, CUJAE, Marianao 15, Ciudad de la Habana, Cuba.

Teléfono: (53 7) 27 1644 Fax: (53 7) 27 1208

Email: goyos@mecanica.ispjae.edu.cu , Email: castaned@mecanica.ispjae.edu.cu

\*\* Universidad de Gante.

Technologiepark 9. B-9052. Zwijnaarde, Gante, Bélgica.

Teléfono: 32 9 264 5762/5667 Fax: 32 9 264 5833/5668

E-mail: emiel.wettinck @rug.ac.be

( Recibido el 7 de mayo de 1999; aceptado el 2 de junio de 1999 )

## Resumen

Los hierros nodulares en general y los austemperizados en particular han sido usados con cada vez mayor frecuencia debido a sus relevantes propiedades mecánicas en comparación con su costo.

En el presente trabajo se valora el comportamiento del hierro nodular ante el trabajo en condiciones de desgaste y corrosión, luego de ser sometido a diferentes tratamientos de austemperizado.

Fueron usados un hierro nodular aleado con níquel y molibdeno y otro no aleado. Ambos hierros fueron sometidos a diferentes tratamientos de austemperización con mantenimientos isotérmicos a temperaturas entre 250°C y 425°C por tiempos entre 15 y 180 minutos.

Las muestras tratadas fueron sometidas a ensayos de desgaste por fricción en condiciones no lubricadas determinando las pendientes de desgaste uniforme para cada caso. La resistencia a la corrosión fue determinada mediante el método potenciométrico usando como medio el jugo de caña sintético.

A partir de los resultados obtenidos se valora la influencia de los diferentes tratamientos sobre las propiedades estudiadas y se determinan los más efectivos desde el punto de vista técnico económico.

**Palabras claves: Hierro nodular, corrosión, desgaste, austemperizado.**

## 1. Introducción

El hierro fundido ha resultado siempre un material de amplio uso en la construcción de máquinas gracias a su bajo costo y excelente colabilidad. En los últimos tiempos su campo de aplicación ha aumentado notablemente gracias al desarrollo del hierro nodular y más recientemente con la aparición del hierro nodular austemperizado.

El hierro nodular austemperizado, internacionalmente conocido por sus siglas ADI (Austempered Ductile Iron) presenta resistencia a la tracción superior a 100 MPa manteniendo una plasticidad notable. Si sumamos a esto las ventajas de bajo costo y ligereza resulta evidente que su uso constituye una promesa interesante.

El ADI resulta básicamente un hierro nodular con un alto índice de nodulización en el cual se alcanzan excepcionales

propiedades a través de un tratamiento isotérmico en la zona de las transformaciones intermedias, logrando de esa forma una estructura bainítica con un determinado porcentaje de austenita retenida en la estructura. Esta estructura provoca una alta resistencia a la tracción unida a una elevada ductilidad, teniendo en cuenta que se trata de un hierro fundido [2]. El costo de este material es superior al del hierro nodular convencional pero inferior al del acero fundido.

El tratamiento térmico aplicado al ADI consiste en una austenización a temperaturas corrientemente comprendidas entre los 850 y los 950°C durante un tiempo adecuado seguido de un enfriamiento rápido hasta la temperatura de austemperizado a la cual se mantiene por un tiempo variable en función de las propiedades requeridas, el tipo de hierro usado etc.

Durante el mantenimiento isotérmico a la temperatura de austemperizado tiene lugar la transformación bainítica. La transformación bainítica en estos hierros se ve afectada considerablemente por la presencia del silicio en la aleación y se caracteriza por la existencia de dos etapas [1].

En la primera etapa la bainita se forma a partir de los granos de austenita y crece rápidamente a sus expensas. El exceso de carbono que se origina por la formación de la bainita no pasa a formar carburos como en los aceros, por el contrario, se mantiene en la fase austenita y eleva su concentración en la misma. Una vez que la austenita alcanza su concentración máxima de carbono la primera etapa concluye. De hecho la velocidad de formación de la bainita disminuye al rechazar el carbono a la austenita residual. La austenita que se obtiene al final de esta etapa resulta estable a temperaturas por debajo de 0° C y por tanto no aparece la transformación martensítica.

La segunda etapa consiste fundamentalmente en la precipitación de carburos a partir de la austenita saturada en carbono. Estos carburos se ubican junto a los listones de ferrita y aumentan la resistencia pero disminuyen las propiedades plásticas [4].

Los parámetros del tratamiento hacen variar sensiblemente las propiedades del material. En sentido general la dureza y la resistencia a la compresión disminuyen al aumentar la temperatura de austemperizado, mientras la resistencia a la tracción aumenta. Desde el punto de vista mecánico la mejor combinación se alcanza al final de la primera etapa. Para lograr la máxima combinación de propiedades debe seleccionarse adecuadamente cada uno de los parámetros del tratamiento teniendo en cuenta la composición de la aleación y la estructura de partida.

Las posibilidades de difusión del carbono juegan un importante papel en la estructura final obtenida en el tratamiento. Si la temperatura de mantenimiento isotérmico es baja, la difusión del carbono está limitada, la austenita residual no se saturará de carbono completamente y al final tendremos alguno carburos finos y dispersos junto a la bainita, que a su vez es mas fina y semejante a la que se presenta en los aceros. El porcentaje de austenita residual debe también ser inferior a la que se presenta con temperaturas superiores [3].

El contenido de austenita presente es responsable del comportamiento mecánico de la aleación, su alta resistencia a la fatiga y en cierta medida de su endurecimiento por trabajo mecánico según la mayoría de los autores.

Además de la resistencia, dureza y ductilidad del ADI otra propiedad importante del mismo resulta su resistencia al desgaste por las numerosas aplicaciones potenciales en piezas sometidas a diferentes tipos de desgaste. En este sentido diferentes trabajos muestran una resistencia al desgaste del ADI superior a la de otros hierros. Se acepta que la presencia de la austenita endurecible contribuye a la resistencia al desgaste del ADI aunque en este aspecto juega un importante papel la severidad del desgaste [6, 7].

Aunque es general el planteamiento de la influencia de la austenita en la resistencia al desgaste del ADI debe destacarse el hecho de que para tiempos de mantenimiento a la temperatura de austemperizado que garanticen el completamiento de la reacción bainítica, deben aparecer en la microestructura carburos que pueden tener una acción importante sobre la resistencia al desgaste. Este aspecto no aparece reflejado en la bibliografía consultada.

En determinadas aplicaciones del ADI su resistencia a la corrosión puede ser un elemento importante. A pesar de que este material no puede presentar una marcada resistencia la corrosión por causa de su estructura, no obstante resulta de gran interés evaluar cómo los diferentes tratamientos pueden afectar este comportamiento. Este aspecto tampoco aparece reflejado en la literatura consultada.

El presente trabajo tiene como objetivo principal caracterizar el comportamiento ante condiciones de fricción no lubricada y corrosión en jugo de caña de composiciones de hierro nodular comunes en el país, sometidos a diferentes regímenes de austemperizado, con el fin de seleccionar materiales de este tipo para el trabajo en las condiciones de la industria azucarera.

## 2. Parte experimental

Se trabajó sobre un hierro nodular no aleado y otro aleado con las composiciones mostradas en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Composiciones de los hierros usados (en %).

Serie	C	Si	Mn	Ni	Mo
N80	3,33	2,33	0,25	0,54	0,29
N40	3,30	2,23	0,35	-	-

Las probetas fueron obtenidas de bloques cilíndricos de 50 mm de diámetro. Fueron usados dos tipos de probetas. Para el ensayo de desgaste se usaron probetas cilíndricas de 5 mm de diámetro y 20 mm de largo. Para los ensayos de dureza, metalografía y corrosión se usaron probetas de 20 mm de diámetro por 15 mm de altura.

Todas las probetas fueron sometidas a un tratamiento térmico de austemperizado consistente en austenización en baño de sales a 900°C durante 45 minutos, seguido de un enfriamiento rápido hasta la temperatura de mantenimiento isotérmico (T) que se varió en cuatro niveles: 250, 325, 375 y 425 °C. El tiempo de mantenimiento isotérmico fue variado entre 15 y 180 minutos, siendo después enfriadas en agua las probetas. Los tratamientos aplicados a cada probeta aparecen en la Tabla 2. Con el fin de valorar la posible influencia de la temperatura de austenización sobre las propiedades estudiadas se trataron muestras a 950° C durante 45 minutos seguido de la austemperización a 425°C.

Las probetas fueron examinadas mediante microscopía óptica y electrónica de barrido con el objetivo de determinar su microestructura. De igual forma se sometieron a un

ensayo de difracción de Rayos X para determinar el contenido de austenita sin transformar y tener una valoración más objetiva del grado de evolución de la reacción bainítica.

Los ensayos de desgaste fueron realizados en una instalación construida al efecto [11] siguiendo el esquema general del tipo “espiga sobre disco”. El ensayo se condujo bajo una presión de 2,5 MPa y a una velocidad de 2,0 m/s, en condiciones de fricción seca. El desgaste se evaluó por variación de dimensiones lineales luego de recorrer 1 200 m, repitiendo el ensayo hasta garantizar realizar 5 mediciones en la zona de desgaste uniforme y evaluar la razón de desgaste a partir de estos datos y la densidad del material.

La corrosión fue evaluada mediante la resistencia de polarización usando como electrolito jugo de caña sintético a 25°C. Como electrodo de referencia se usó calomel saturado.

### 3. Análisis de los resultados

El análisis metalográfico realizado a las muestras evidenció en todos los casos, tanto en el hierro aleado como en el no aleado, una estructura predominantemente bainítica. Los listones de bainita se presentaron con variaciones en su finura y en su geometría, en función de la temperatura de tratamiento usada, alcanzando una estructura marcadamente acicular en las muestras tratadas a 250°C. Las zonas de austenita variaban en magnitud y dispersión según la muestra. El conteo de nódulos arrojó valores entre 120 y 150 nódulos/mm<sup>2</sup>. La fase grafito ocupa entre el 8 y el 12 % del área de análisis en las diferentes muestras. Las figuras 6, 7 y 8 muestran algunas de las estructuras obtenidas.

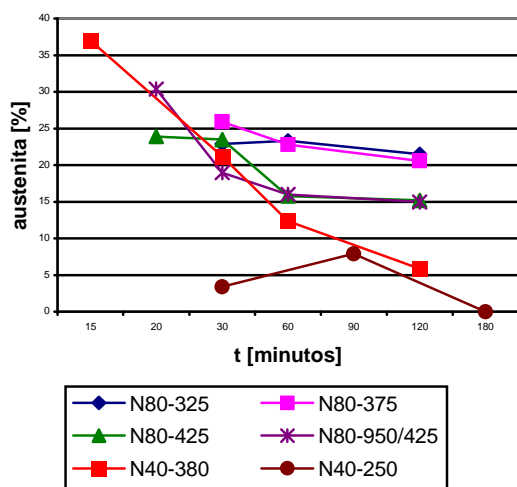


Fig. 1. Comportamiento de la austenita residual en función del tiempo de mantenimiento isotérmico.

Tabla 2. Tratamientos aplicados a las probetas y resultados obtenidos.

Código	Taust [°C]	Ttrat [°C]	t [min]	A [%]	w [mg/m].10 <sup>-5</sup>	Rp [kΩ/cm <sup>2</sup> ]
809	900	325	30	22,9	404	1,62
811	900	325	60	23,3	343	1,8
813	900	325	120	21,5	438	1,82
823	900	375	30	25,9	444	2,4
825	900	375	60	22,8	432	2,2
827	900	375	120	20,6	427	1,62
801	900	425	20	23,9	541	2,2
803	900	425	30	23,5	480	1,83
805	900	425	60	15,8	797	1,55
807	900	425	120	15,2	584	1,5
810	950	425	20	30,4	404	1,6
817	950	425	30	19,0	501	1,77
819	950	425	60	15,6	702	1,9
821	950	425	120	15,2	434	2
402	900	380	15	37,0	453	2,1
401	900	380	30	21,2	695	2,31
403	900	380	60	12,4	791	1,78
404	900	380	120	5,88	537	1,56
407	900	250	30	3,4	515	1,83
405	900	250	60	7,9	457	1,75
406	900	250	120	0,0	497	1,62

Los resultados de la determinación de austenita se han graficado en la figura 1 para una mejor comprensión. Estos resultados corroboraron los obtenidos mediante el análisis metalográfico en el sentido de que la reacción bainítica se encontraba iniciada en todos los casos y en la mayoría de ellos culminando la primera fase de la misma o iniciando la segunda etapa de la reacción en aquellas con tiempos de exposición más prolongados.

Se destaca el bajo contenido de austenita obtenido en la serie N40 a temperatura de 250 °C. Este comportamiento está en concordancia con lo reportado en la literatura. El análisis metalográfico no permite detectar la presencia de carburos precipitados. Esto puede apreciarse en la figura 6.

Los valores de austenita obtenidos para la serie N80 presentan poca variación en función del tratamiento aplicado. Como se aprecia los valores son de medios a altos en correspondencia con el desarrollo de la reacción.

## 4. Resistencia al Desgaste

En la Fig. 2 se muestra el comportamiento de las diferentes muestras ante el desgaste.

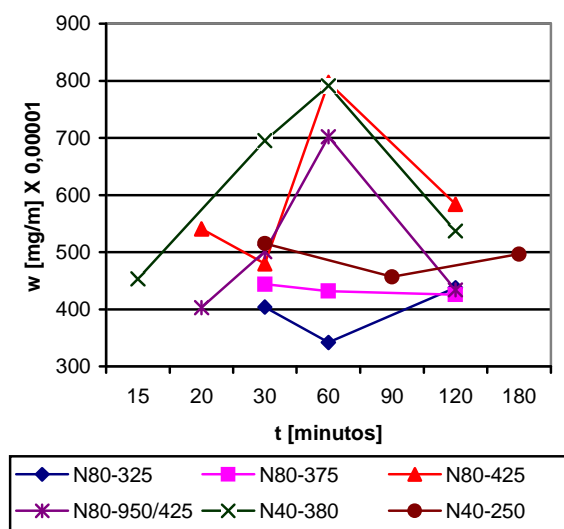


Fig. 2. Relación entre el desgaste y los parámetros del tratamiento.

En el gráfico se observan algunos comportamientos interesantes comenzando con los destacados resultados de la serie N80 tratada a 325 °C y a 375 °C. La serie N40 tratada a 250 °C muestra también buenos resultados así como todos los casos con bajo tiempo de mantenimiento, independientemente del nivel de temperatura de tratamiento usado.

Si comparamos los resultados con las microestructuras obtenidas podemos advertir que se presentan buenos resultados de resistencia al desgaste tanto en estructuras con una fuerte presencia de la austenita como es el caso de las N80 tratadas a 325 °C y 375 °C o todas las de tiempo de mantenimiento de 20 minutos. Sin embargo la N40 tratada a 250 °C con muy bajos niveles de austenita presenta también un comportamiento satisfactorio ante el desgaste.

En la Fig. 3 se puede apreciar la relación existente entre el porcentaje de austenita presente en cada muestra y su resistencia al desgaste. En este gráfico se ha asociado cada muestra con el tiempo de austemperizado empleado de forma tal que podemos apreciar el grado de completamiento de la reacción.

Se aprecia entonces que existen dos marcadas tendencias en el comportamiento de la relación. Podemos comprobar que existe correlación entre el contenido de austenita presente y la resistencia al desgaste mostrando una

disminución del desgaste a medida que el contenido de austenita aumenta.

Sin embargo el comportamiento es marcadamente diferente en las muestras con altos tiempos de exposición, mostrando una menor sensibilidad a la presencia de la austenita que las muestras tratadas con pequeños tiempos de exposición. La razón de este comportamiento es atribuible a la presencia de los carburos provocados por la descomposición de la austenita. La única excepción en este comportamiento lo constituye la muestra de la serie N40 tratada a 250 °C durante 30 minutos. Esta excepción confirma la hipótesis enunciada anteriormente debido a que en estas bajas temperaturas de tratamiento ambas etapas de la reacción se desarrollan simultáneamente dando lugar a la precipitación de carburos por descomposición de la austenita desde el comienzo del tratamiento. Por otro lado la estructura de las muestras de esta serie es muy fina y dura.

Del gráfico de la figura 3, es posible extraer una conclusión importante desde el punto de vista económico. Obsérvese que las muestras tratadas con tiempos cortos de exposición presentan un buen comportamiento ante el desgaste. Teniendo en cuenta que esto significa una mayor disponibilidad de las instalaciones de tratamiento y un menor gasto energético resulta recomendable utilizar este tipo de tratamiento en todo momento.

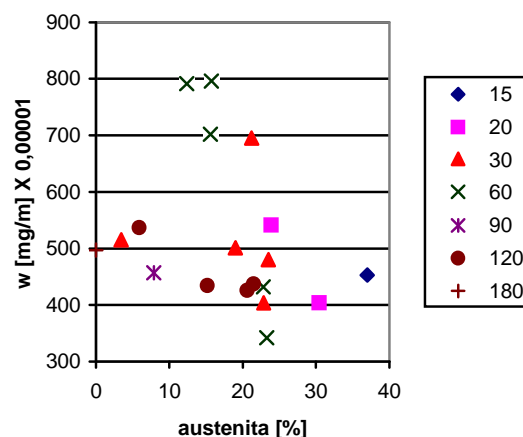


Fig. 3. Relación entre el contenido de austenita y el desgaste

## 5. Resistencia a la Corrosión

Los resultados obtenidos en la aplicación del ensayo se muestran en la figura 4. Como puede observarse no existen marcadas diferencias en el comportamiento de las diferentes muestras. Ello es debido a que la estructura altamente heterogénea que producen los tratamientos aplicados determina el comportamiento general de las muestras.

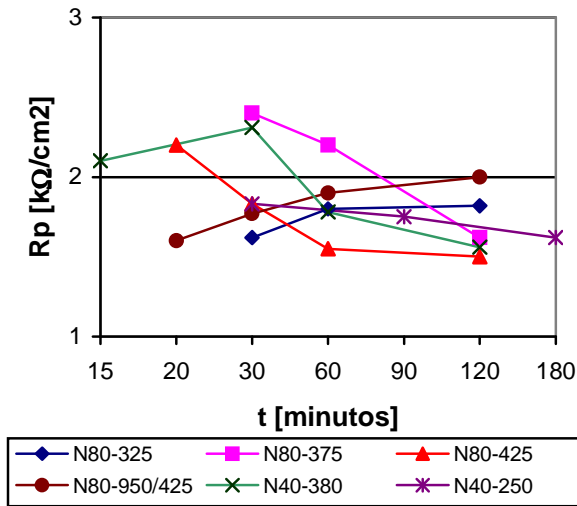


Fig. 4. Comportamiento de la corrosión en jugo de caña sintético.

Es de destacar que los resultados alcanzados como grupo resultan aceptables en comparación con otras aleaciones como los aceros inoxidable si partimos de la considerable economía que significan estos hierros. Ello se debe en lo fundamental a la limitada agresividad del jugo de caña.

## 6. Posibilidades de Aplicación de los Tratamientos

Con vistas a determinar las mejores variantes de tratamiento para el trabajo en condiciones de desgaste y corrosión se han situado los mismos en el gráfico de la figura 5. Para poder valorar económicamente estos resultados se muestra el tiempo de tratamiento en cada caso.

Las mejores opciones se encuentran en la mitad inferior del gráfico toda vez que las diferencias en la resistencia a la corrosión no son notables. En el cuadrante inferior derecho se ubican las de mejor desempeño ante la corrosión y el desgaste.

En el gráfico vemos que existe un buen número de tratamientos que pueden resultar aplicables. Entre ellos debemos destacar aquellos que se realizan con pequeños tiempos de permanencia.

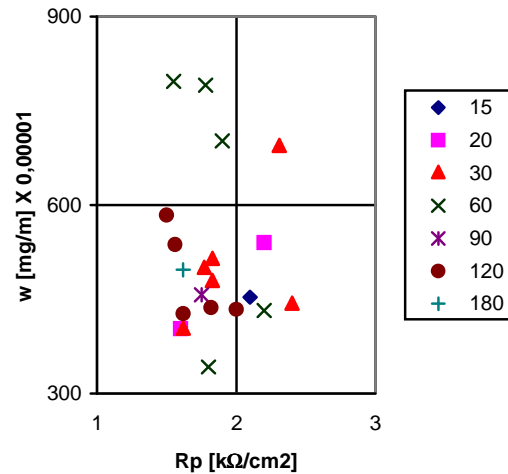


Fig. 5. Comportamiento de las muestras ante la corrosión y el desgaste.

Indudablemente el más prometedor resulta la combinación de N40 a  $380^{\circ}C$  durante 15 minutos. Este es un hierro no aleado, con un costo bajo al que se ha aplicado un tratamiento económico por su corta duración.

No deben descartarse las variantes del propio N40 con tratamiento a  $250^{\circ}C$ , especialmente la que presenta tiempo de 30 minutos y que muestra aceptables propiedades.

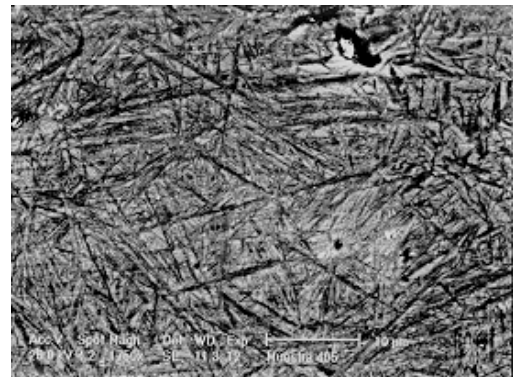


Fig. 6. Muestra 405. Aleación N40 tratada a  $250^{\circ}C$ .

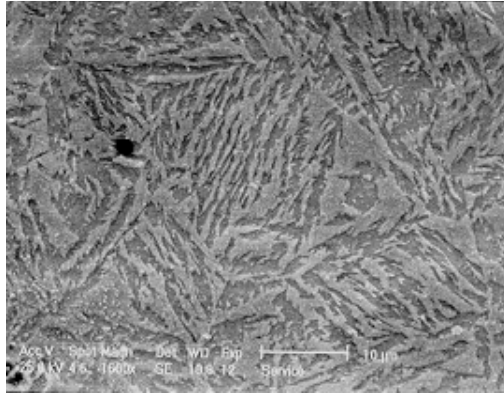


Fig. 7. Muestra 807. Aleación N80 tratada a 425°C.

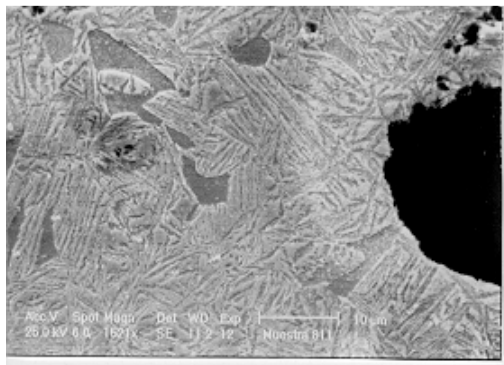


Fig. 8. Muestra 811. Aleación N80 tratada a 325°C.

## 5. Conclusiones

- Las diferentes variantes de tratamiento de austemperización aplicados no provocan diferencias sustanciales en el comportamiento ante la corrosión de los hierros nodulares ensayados, sean aleados o no, en presencia de jugo de caña.
- Es posible obtener buenos resultados en la resistencia al desgaste de las aleaciones tanto en estructuras con una alta proporción de austenita como aquellas en que aparecen carburos precipitados a partir de la descomposición de esta.
- Desde el punto de vista económico el hierro no aleado representa una opción satisfactoria para el trabajo en condiciones de desgaste y corrosión en

jugo de caña. La opción de tratamiento durante corto tiempo resulta realmente una variante muy satisfactoria, tanto con temperaturas de 380°C como para 250°C.

- A partir de las consideraciones expuestas se recomienda el uso de la aleación N40 con bajos tiempos de exposición siempre que las condiciones de resistencia exigidas y la propia geometría de la pieza tratada lo permitan. En caso contrario puede usarse la N80, también con pequeños tiempos de tratamiento y a temperatura de 325°C.
- En el caso de que las condiciones de resistencia sean determinantes los resultados obtenidos servirán para determinar la mejor opción dentro de las características mecánicas exigidas.

## Bibliografía

1. Johansson M., Austenitic-bainitic ductile iron. AFS Trans., Vol.85, 1977.
2. Voigt, R.C. . Austempered ductile Iron, Processing and Properties, Cast Metals, Vol.2 #2, 1989.
3. Takita, M., Ueda Y., Effect of retained austenite on properties of ADI. Cast Metals Vol.1 #3, 1988.
4. Rouns, T.N. et al. On the structure and properties of ADI. AFS Trans., Vol.92, 1984.
5. Conference Report. 1991 World Conf. On ADI. Cast Metals, Vol.4 #1, 1991.
6. Wu-Sheng Z. Et al. Abrasion resistance of ADI, Cast Metals Vol.6 #2, 1993.
7. Prado, J.M. et al. Dry sliding wear of ADI. Mat. Sc.&Tech., Vol 11, March 1995.
8. Prasanna, N.D. et al. Dry sliding wear characteristics of Austempered Ductile Iron. Trans AFS, Vol. 102, 1994
9. Díez, C., Goyos L., Ordóñez U., El índice de endurecimiento en las fundiciones nodulares austemperizadas. Memorias del II Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. La Habana, Setiembre de 1997.
10. Goyos L. et al, Influencia del tratamiento térmico en el desgaste de un hierro nodular producido en Cuba. Memorias del I Encuentro de Ingeniería de Materiales, La Habana, Noviembre de 1996.
11. Bueno López, B. Instalación experimental de desgaste metal-metal. Trabajo de Diploma. Fac. de Ing. Mecánica. ISPJAE. 1996.

## Behavior of austempered ductile iron under wear and corrosion conditions

### Abstract

Nodular irons and particularly austempered ductile iron has been used more and more due to their excellent mechanical properties in comparison with their cost.

Presently work deals on behavior of nodular iron working under wear and corrosion conditions, after being submitted to different austempered treatments.

A nodular iron alloyed with nickel and molybdenum were used as well as a not alloyed one. Both irons were treated under different austempered treatment combinations using isothermal maintenance to temperatures between 250°C and 425°C and spending times between 15 and 180 minutes.

Samples were submitted to non-lubricated wear using a "pin on disk" method evaluating the stable wear ratio while corrosion resistance was determined by means of potentiometric analysis using synthetic cane juice.

From pointed out results is established the influence of different treatments on the studied properties and the most effective treatments are determined from the economical point of view.

**Key words:** nodular iron, corrosion, wear, austempered.

## III Encuentro de Ingeniería de Materiales



Septiembre 12 - 15, 2000, La Habana, Cuba

---

### ***TEMAS PRINCIPALES***

---

**Metalografía y Tratamiento Térmico, Tribología, Materiales Compuestos, Biomateriales, Materiales para la Electrónica, Cerámicas y Polímeros, Mecánica de la Fractura, Metalurgia, Maquinado, Metrología, Soldadura, Economía en la Fabricación, Conformación, Maquinas de Control Numérico**

---

---

**Para enviar resúmenes o solicitar información adicional**

---

Comité Organizador CCIM'2000  
Instituto Superior Politécnico *José Antonio Echeverría*  
Facultad de Ingeniería Mecánica  
Calle 127 s/n, CUJAE, Marianao 15, Ciudad de La Habana, Cuba  
Teléfono: (537) 20 2267 Fax: (537) 27 1208  
E-mail: ccim@mecanica.ispjae.edu.cu