

# Estudio experimental sobre el comportamiento del hierro austemperado nitrurado (adi) a la fatiga de contacto.

C. Figueroa\*, U. Ordóñez\*, J. Telésforo\*\*, A. Menezes\*\*, A. Sinatora\*\*, D. K. Tanaka\*\*.

\*Departamento de Tecnología. Facultad de Ingeniería Mecánica.

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.

Calle 127 s/n. Apartado 6028. Habana 6. Marianao. Ciudad de La Habana. Cuba.

\*\*Laboratorio de Fenómenos de Superficie. Escuela Politécnica. USP.

Av. Profesor Mello Moraes 2231, 05508-900. São Paulo. Brasil.

(Recibido el 23 noviembre del 2000, aceptado el 15 de marzo del 2001)

## Resumen

En el presente trabajo se muestra un estudio sobre el hierro fundido austemperado nitrurado sometido a pruebas de fatiga de contacto. El mismo se austenizó y austemperó a las temperaturas de 900 y 380°C respectivamente, seleccionándose en ambos casos un tiempo de 2 horas. Después se le aplicó un proceso de nitruración gaseosa a 570°C durante 6 horas.

Las experiencias fueron realizadas en una máquina para el ensayo de fatiga de contacto con discos. Las presiones Hertzianas utilizadas fueron de 1.73, 1.78, 2.04, 2.41, 2.46 y 2.71 GPa.

La composición de fases se determinó utilizando la difracción de rayos X, evidenciándose la presencia de los compuestos  $\epsilon$  ( $\text{Fe}_{2.3}\text{N}$ ) y  $\gamma$  ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ). Los defectos tales como: pittings spalls y grietas fueron observados por medio de la microscopía electrónica de barrido (SEM). Los resultados indicaron que la capa nitrurada entre 5 y 6 micras de espesor desaparece bajo la acción de las presiones de contacto. Por otra parte se pudo detectar una disminución de la resistencia a la fatiga en el ADI nitrurado cuando fueron utilizadas bajas presiones Hertzianas. También se comprobó que los nódulos de grafito actúan como barreras a la propagación de grietas.

**Palabras claves:** Fatiga de contacto, Capa nitrurada, hierro dúctil austemperado, máquina de fatiga con discos, rayos X.

## 1. Introducción.

El uso del hierro fundido austemperado en la fabricación de partes y piezas para la industria mecánica ha tenido un incremento importante debido a las ventajas que el mismo muestra, pudiéndose citar entre ellas: su baja densidad con elevada resistencia, buena maquinabilidad, baja sensibilidad a los defectos superficiales, ahorro de material al obtenerse piezas fundidas y eliminarse gran parte del maquinado.

Dentro de los diversos tipos de piezas utilizados en la industria mecánica, el ADI ha sido recomendado para la fabricación de ruedas dentadas en transmisiones por engranajes[1-2]. Estos elementos están sometidos al efecto de grandes cargas cíclicas y dinámicas, al desgaste y a la fatiga de contacto, constituyendo esta última sollicitación, la causante de serios daños superficiales al provocar la formación de *pittings* y

*spalls*. Los defectos antes mencionados aparecen debido a la formación de grietas superficiales y subsuperficiales, las cuales crecen bajo la acción repetida de las cargas de contacto[3-4], estas grietas que en un principio son pequeñas alcanzan posteriormente un tamaño lo suficientemente grande para provocar el desprendimiento del material de la superficie, resultando finalmente un *pitting* o un *spall*.

Varios tratamientos termoquímicos han sido recomendados para mejorar la resistencia al desgaste superficial y a la fatiga de contacto. Recientemente[5] se ha estudiado el proceso de nitruración sobre el ADI, tratándose de encontrar un compromiso entre la gran tenacidad que ofrece la combinación estructural de la ferrita bainítica y la austenita retenida de la matriz y la dureza y resistencia al desgaste que muestra la capa nitrurada.

Aunque pudiera considerarse que durante la nitruración a 570°C las propiedades del ADI cambien

debido al envejecimiento, ha sido demostrado que al menos la dureza se mantiene inalterable por la presencia del cobre en la aleación[6].

El presente trabajo tiene como objetivo fundamental, el estudio de la influencia de la capa nitrurada en la resistencia a la fatiga de contacto del ADI utilizando el método de los discos de prueba y de esta forma obtener el límite de durabilidad de la aleación para diferentes presiones Hertzianas. Además se analizará la influencia que tiene la estructura en la formación de defectos bajo la acción de las tensiones de contacto.

## 2. Materiales y métodos de investigación.

Las muestras fueron fundidas y maquinadas según se establece en la norma de fabricación de la máquina de ensayo. La composición química de las mismas puede ser apreciada en la Tabla 1. La configuración geométrica de los discos después del acabado permite que los mismos al ponerse en contacto actúen como dos esferas de 152 mm de diámetro cada una. La rugosidad promedio de las superficies de contacto alcanzó un valor de 0.5  $\mu\text{m}$ .

**Tabla.1** Caracterización del ADI después de fundido.

Composición química %							
C	Si	Mn	P	S	Mg	Mo	Cu
3.52	2.94	0.2	0.03	0.02	0.048	0.29	1.42
No de Nódulos			Dureza HB		Microestructura		
180-200 Nod/mm <sup>2</sup>			280		Perlita > 90%		

Las probetas fueron austenitizadas a la temperatura de 900<sup>o</sup>C durante 2 horas en un horno de atmósfera controlada, más tarde fueron austemperadas a la temperatura de 380<sup>o</sup>C durante 2 horas con el objetivo de obtener una estructura de bainita superior y austenita retenida.

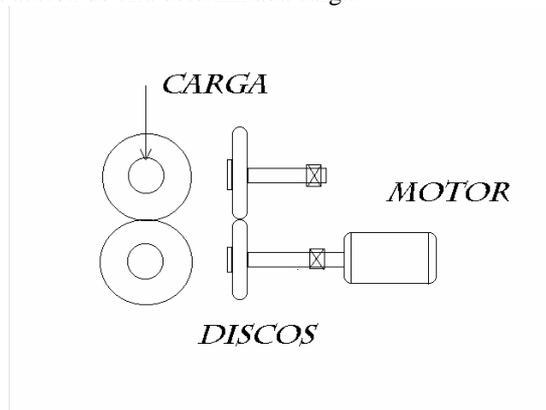
El proceso de nitruración se llevó a cabo a la temperatura de 570<sup>o</sup>C en una atmósfera de amoníaco disociado (30 %) durante 6 horas.

La caracterización metalográfica de la capa nitrurada y del núcleo se realizó utilizando la microscopía óptica y la electrónica de barrido, (SEM) pudiéndose detectar una profundidad de capa media de 5.5  $\mu\text{m}$ .

El comportamiento de la microdureza tanto superficial como subsuperficial se determinó utilizando una carga de 50 gramos y un tiempo de exposición de 10 segundos. La máxima dureza alcanzada en la superficie mostró un valor de 670 HV.

La composición de fases en la capa nitrurada se determinó por medio de la difracción de rayos X, la cual se realizó con emisión de cobre Cu K  $\alpha$  en los ángulos 2 $\theta$  desde 25 a 120<sup>o</sup>. Las fases  $\gamma$  y  $\epsilon$  fueron reveladas en los índices  $hkl$  (111), (200), (101) y (220).

Para la determinación del comportamiento del ADI nitrurado a la fatiga de contacto se utilizó una máquina de ensayo profesional del tipo Disc-Testing (PLINT & Partners LTD, TE73HS/HT), cuyo principio de funcionamiento se muestra en la Figura 1, y consiste en poner en rotación dos discos unidos por sus bordes bajo la acción de una determinada carga.



**Figura 1.** Esquema de la máquina de fatiga de contacto.

Los ensayos de fatiga de contacto fueron realizados a 5000 r.p.m. sin lubricación. Las presiones máximas:

( $P_0$  máx.) utilizadas fueron de 1.73, 1.78, 2.04, 2.41, 2.46, 2.71 GPa, cuyos valores se calcularon utilizando las expresiones[7] 1-5.

Donde:

$P$  = Carga (N)

$a$  = semi-eje de contacto (mm)

$P_0$  = Presión de Hertz ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$E_m$  = Módulo de elasticidad medio ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$D$  = Diámetro de los discos (mm)

$\nu$  = Coeficiente de Poisson del ADI

$E_1$  = Módulo de elasticidad de la capa nitrurada

$E_2$  = Módulo del ADI.

$$a = 0.721[P(\eta_1 + \eta_2)D_1D_2/(D_1 + D_2)]^{1/3} \quad (1)$$

$$P_0 = 1.5P/\pi a^2 \quad (2)$$

$$\eta_1 = 1 - \nu_1^2/E_m \quad (3)$$

$$\eta_2 = 1 - \nu_2^2/E_m \quad (4)$$

$$E_m = 2 E_1 E_2 / (E_1 + E_2) \quad (5)$$

Se tomó como módulo de elasticidad medio para el ADI un valor de 158 GPa. En el caso de la capa nitrurada se seleccionó 221 GPa. El coeficiente de Poisson en todos los casos se consideró el del ADI, cuyo valor es de 0.275. Las cargas que actuaron entre

los discos alcanzaron valores de 14600, 13190, 11100, 6300, 4200, 3900 N.

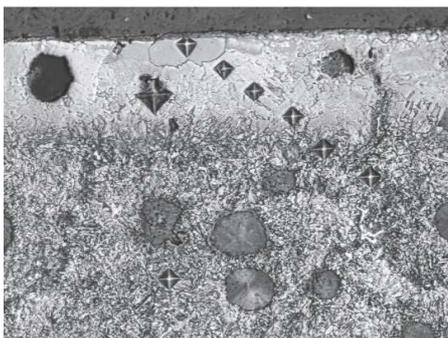
Las pruebas de fatiga de contacto fueron monitoreadas utilizando un sensor de vibraciones, el cual se calibró hasta que un defecto visible surgiera en la superficie de los discos. Al ocurrir esto la máquina se desconecta automáticamente, dando por finalizada la prueba para esas condiciones de ensayo.

Por otra parte, el análisis morfológico de los defectos se realizó tanto en la sección transversal como en la longitudinal de los discos, siempre prestando mayor atención en la zona central de la pista de rodamiento por ser la parte donde debe actuar la mayor presión. A través de este análisis se pudieron reconocer los posibles mecanismos que dieron lugar a la formación de los *pittings* y *spalling*. En este caso se utilizó como técnica de investigación la microscopía electrónica de barrido (SEM) con emisión de electrones secundarios y voltaje de aceleración de 25 Kv.

Como criterio del comportamiento del desgaste se controló la pérdida de masa con una precisión de 0.01 gramos.

### 3. Resultados y discusión.

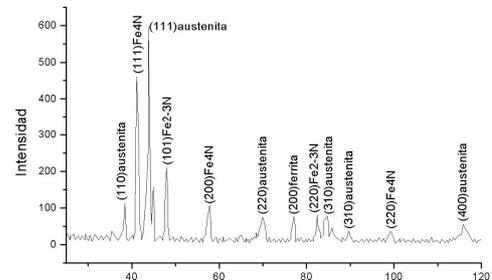
En la Figura 2 se puede apreciar una zona transitoria de 110  $\mu\text{m}$  de espesor, lo que confirma la existencia de una capa difusiva. Además en la misma superficie la difracción de rayos X (Figura 3) mostró la presencia de nitruros del tipo  $\text{Fe}_{2.3}\text{N}$  ( $\epsilon$ ) y  $\text{Fe}_4\text{N}$  ( $\gamma$ ) en un espesor aproximado de 6  $\mu\text{m}$  (Figura 4).



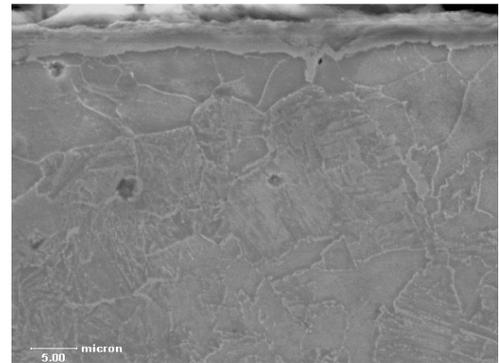
**Figura 2.** Zona de difusión 200 X.

Durante el análisis del comportamiento de la microdureza en la sección transversal de la capa nitrurada se detectó que entre la zona transitoria y el núcleo del ADI no existen diferencias significativas. Una gran diferencia se apreció entre la capa blanca

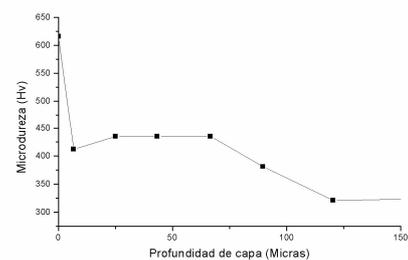
compuesta por nitruros de elevada dureza y el núcleo (Figura 5).



**Figura 3.** Patrón de difracción de rayos X.



**Figura 4.** Capa blanca de nitruros 1000X.

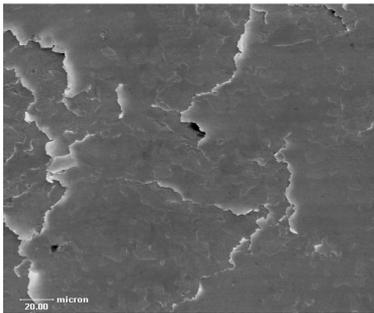


**Figura 5.** Perfil de microdureza.

Durante el análisis metalográfico de la superficie fatigada se detectó que la capa blanca desaparece bajo la acción de las cargas cíclicas de contacto, esto ocurre debido a la presencia de nitruros frágiles, los cuales se

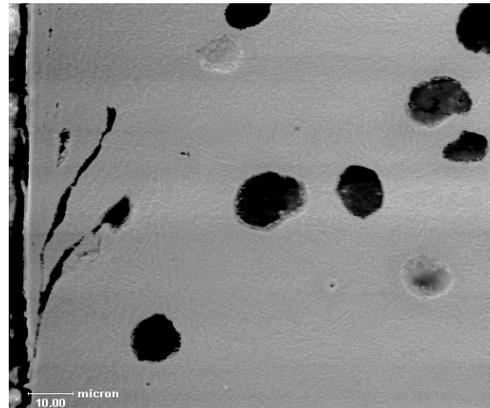
rompen por la acción de las altas presiones. También la presencia de defectos de fundición y de los propios nódulos después de deformados pueden actuar como centros de nucleación de grietas dentro de la zona transitoria.

Lajtín [8] consideró que es más ventajoso para incrementar la resistencia a la fatiga de contacto la presencia de una capa nitrurada compuesta solamente por la mezcla del nitruro  $\gamma'$  y la ferrita nitrogenada ( $\alpha_n$ ). Por otra parte Dommarco [9] propuso utilizar en el ADI una capa blanca coquillada sin nódulos con el objetivo de evitar que estos actuaran como centros nucleadores de grietas después de ser deformados bajo la acción de cargas externas. En el mismo análisis superficial se detectó la presencia de un proceso de delaminación, (Figura 6) el cual estuvo presente para todas las condiciones de ensayo, haciéndose más intenso en la medida que fueron utilizadas mayores presiones de contacto. Este fenómeno, según plantea Nam [10] es precedido por la formación de una red de grietas superficiales, las cuales aparecen como resultado del movimiento de las dislocaciones debido a la presencia de las tensiones superficiales de contacto.

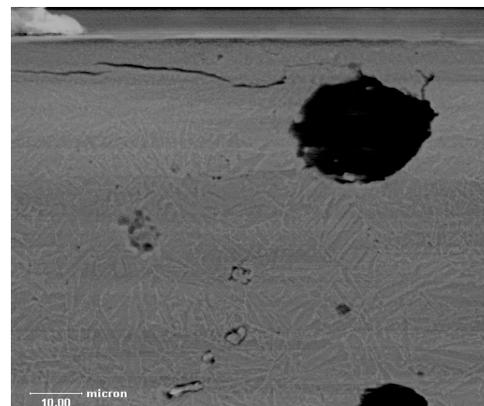


**Figura 6.** Proceso de delaminación 500 X.

En el análisis de la sección longitudinal y transversal de la pista de rodamiento, se evidenciaron grietas superficiales formando ángulos de  $20^\circ$  y  $30^\circ$ , (Figura 7) algunas de estas continúan su propagación de forma paralela a la superficie, alcanzando un tamaño lo suficientemente grande para formar un *spalling* (Figura 8). Estas grietas subsuperficiales pueden aparecer debido a la presencia de defectos de fundición y de los nódulos deformados de grafito, los cuales actúan como centros de nucleación de las mismas (Figura 9) independientemente de que los defectos no se encuentren en el plano de las máximas tensiones de cizallamiento. La propagación de grietas en la matriz del ADI ocurre debido a la presencia de las tensiones de contacto y también al estado tensional que puede provocar el avance de una grieta principal.

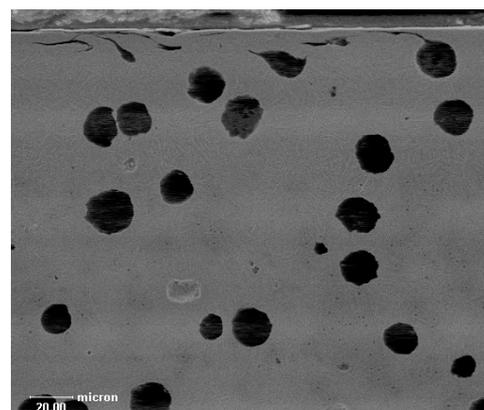


**Figura 7.** Grietas superficiales 500X.

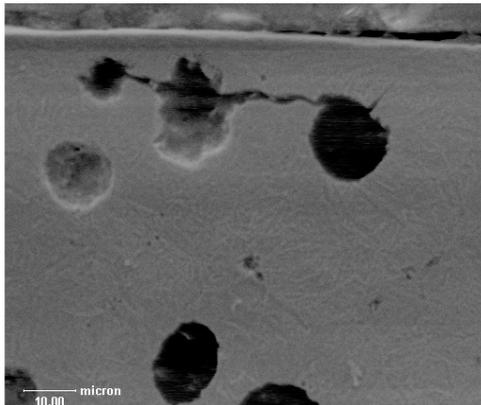


**Figura 8.** Grietas paralelas a la superficie 1000 X.

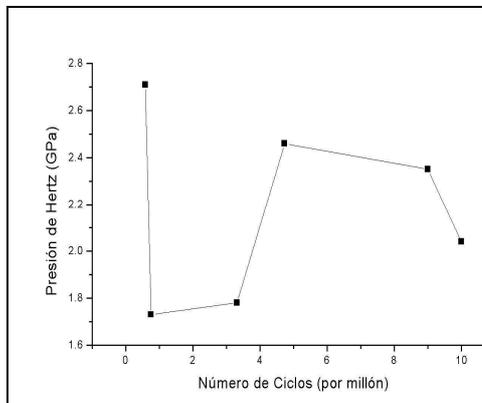
Por otra parte la presencia de los nódulos de grafito puede obstaculizar la propagación de las grietas cuando estos conservan su forma esférica [9] (Figura 10).



**Figura 9.** Nucleación de grietas en nódulos 300 X



**Figura 10.** Grieta interrumpida por nódulos de grafito 500 X.



**Figura 11.** Resultados de la prueba de fatiga de contacto.

El comportamiento del ADI nitrurado a la fatiga de contacto puede ser apreciado en la Figura 11. Los puntos que más se destacan en la curva son aquellos donde la resistencia a la fatiga del ADI se ve reducida por la acción de bajas tensiones de contacto, es algo sin precedentes en la literatura, pero que muy bien puede estar relacionado con la presencia de factores dinámicos debido a la geometría y al balanceo siempre inexacto de los discos. Los principales resultados de las pruebas de fatiga de contacto se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Resultados de las pruebas de fatiga de contacto.

No. del par	Carga aplicada (N).	P <sub>0</sub> Máx. (GPa)	Máx. tensión cortante (GPa)	No. de ciclos 10 <sup>6</sup>	Pérdida de masa (gramos)
1	3900	1.73	0.58	0.75	0.14
2	4200	1.78	0.59	3.31	0.26
3	6300	2.04	0.68	9.87	0.79
4	11100	2.41	0.82	4.73	2.09
5	13190	2.46	0.87	9.62	3.06
6	14600	2.71	0.90	0.58	2.59

Por otra parte, la pérdida de la masa de los discos tuvo el mismo comportamiento que algunos aceros con estructura bainítica[11].

Considerando los resultados alcanzados en el presente trabajo, donde se comprobó que la capa nitrurada desaparece bajo la acción de las cargas de contacto, probablemente por presentar esta un comportamiento frágil y donde se demostró además la influencia de los nódulos deformados en la formación de grietas, se recomienda obtener una capa con mayor tenacidad y una profundidad más allá de donde aparecen las máximas tensiones de cizallamiento.

#### 4. Conclusiones.

- La capa compuesta por nitruros del tipo Fe<sub>2-3</sub>N y Fe<sub>4</sub>N desaparece bajo la acción de las cargas de fatiga de contacto. Este comportamiento debe estar vinculado en alguna medida a la fragilidad de dichos nitruros.
- La presencia de nódulos de grafito deformados y defectos de fundición actúan como centros de iniciación de grietas, aunque aquellos nódulos que conservan su forma constituyen barreras a la propagación de estas..
- El proceso de delaminación estuvo presente en la superficie del ADI nitrurado durante la fatiga de contacto. Se considera que este mecanismo de desgaste es característico del ADI con matriz envejecida.
- El límite de fatiga del ADI nitrurado se ve reducido cuando se emplean bajas carga de contacto. Este comportamiento probablemente está vinculado a los efectos dinámicos que pueden aparecer durante los ensayos.

#### 5. Bibliografía.

1. J. Tartera: Fundición, 1985 noviembre/diciembre, 25-32.
2. R. A. Harding: BCIRA Journal Repot 1607, Nov 1984, 469-474.
3. B. Aldfreddson: Engineering Fracture Mechanics, 2000, 65, 89-106.
4. S. Glodez: Computers and Structures, 1999, 73, 475-483.
5. J. Vatavuk: VI Congresso e Exposição Internacionais de Tecnologia da Mobilidade. SAE São Paulo Brasil 1997.
6. U. Ordóñez: in Proc. Workshop sobre Tratamentos de Superfície na Indústria Automobilística. São Paulo, Brasil, 1998, 87-93.
7. P. Boreis: 'Advanced Mechanics of Materials', 1993, USA.

8. Yu. M. Lajtin: 'Tratamiento Qimicotérmico de los Metales', 1989, Rusia.
9. R. C. Dommarco: Wear, 1998, 221, 69-74.
10. . Nam: Wear, 1973, 25, 111-124.
11. G. Bayer: 'Mechanical Wear Prediction and Prevention', 1994, USA.

---

## Experimental study to contact fatigue behavior of nitrided-austempered ductile iron.

### Abstract

This paper presents a study on the behavior of nitrided austempered ductile iron (ADI) under contact fatigue tests. ADI was austenitized at 900°C for 2 hours and austempered at 380°C for 2 hours. Later, the ADI was nitrided at 570°C for a period of 6 hours.

The contact fatigue tests were carried out using a disc test machine. Hertzian pressures of 1.73, 1.78, 2.04, 2.41, 2.46 and 2.71 were used during the tests.

The phase composition of nitride layer was determined using X-ray analysis, which detected the presence of the  $\epsilon$  and  $\gamma'$  phases. The pitting, spalls and cracks that appeared on the surface were observed in a scanning electron microscope (SEM).

The results indicated that the white nitrided layer from 5 to 6  $\mu\text{m}$  deep on ADI disappeared during the contact fatigue tests. Also it was confirmed the decrease of the endurance limit of nitrided ADI for the lowest Hertzian pressures. Moreover it was detected that the graphite nodules act as a barrier to propagation of cracks.

**Key words:** Contact fatigue, nitrided layer, austempered ductile iron, discs test machine.