

# Consideraciones sobre la rotura por fatiga de contacto en el hierro nodular austemplado.

**D. Moreno Mur, C. Figueroa Hernández.\***

Copextel S.A., División TVS, Dirección Integrada de Proyecto  
dmorenomur@hotmail.com

\*. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría". Facultad de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Tecnología de Construcción de Maquinarias.  
Calle 119 s/n, CUJAE, Marianao 15. Ciudad de La Habana. Cuba.  
Teléf.: (537)271208. Fax: (537)277129 ó 272964.

(Recibido 4 de Diciembre de 2003, aceptado 13 de Febrero 2004).

## Resumen.

El presente trabajo considera como factor importante la variación de la geometría del nódulo de grafito en el cálculo del número de ciclos necesarios durante la formación de un pitting en una fundición nodular austemplada. En este caso se tomó en cuenta la aparición de una energía de deformación alrededor de este y se consideró el material con propiedades homogéneas. Es analizada la influencia de la variación de la carga, los valores de los diámetros de contacto, el tamaño del nódulo de grafito, de la profundidad donde aparece el nódulo en la geometría del nódulo, por ser estos factores importantes en la iniciación y propagación de grietas por fatiga de contacto. Se trabajó con las profundidades donde aparecen las máximas tensiones tangenciales, las cuales se obtuvieron de las expresiones de Hertz, con valores de carga dentro del límite elástico. Luego se modela por elementos finitos el mecanismo de fractura, en el sistema ALGOR 12.06, y se realiza una regresión múltiple en el sistema STATGRAPHICS, obteniendo modelos con buenos coeficientes de regresión y niveles de confianza.

**Palabras claves:** Fatiga de contacto, factura, grietas, nódulo grafito, FEM.

## 1. Introducción.

En una gran cantidad de sistemas mecánicos que están sometidos a los efectos de la fatiga superficial, como es el caso de los engranajes, ruedas y rieles de ferrocarril o rodamientos, se requiere de pronósticos para la determinación de su vida útil. Estos pronósticos se hacen fundamentalmente a partir de ensayos de laboratorio donde finalmente se obtiene una curva que describe el comportamiento de las tensiones que son aplicadas en la superficie del material con respecto al número de ciclos de aplicación de la carga, notándose en todos los casos un aumento de la vida del material cuando las tensiones aplicadas son menores. Para la obtención del comportamiento antes citado se requiere de un gran número de ensayos por lo que se debe disponer de mucho tiempo y de los recursos necesarios.

En el presente trabajo se trata de obtener una metodología capaz de determinar la cantidad de ciclos necesarios para la formación del pitting.

El modo de manifestarse la rotura por fatiga es mediante la aparición del pitting, o lo que es lo mismo, la formación de pequeños cráteres en la superficie de las piezas que pueden crecer si se continúa la explotación de las mismas. La formación de estos cráteres provoca la pérdida de eficiencia en las maquinarias, producto de

la aparición de vibraciones e incremento de la temperatura. También pueden motivar la formación de grandes grietas y con esto la aparición de roturas desastrosas.

El proceso de formación del pitting ocurre de forma general a partir de una grieta que se inicia debajo de la superficie del metal y que crece bajo la acción de cargas cíclicas. Este caso por ser el más común es el que ocupa el desarrollo del presente trabajo.

El ciclo completo de formación de un pitting [1] está dado por las siguientes etapas:

- Período de iniciación de la grieta.
- Propagación de la grieta
- Rotura del material en la superficie.

La vida total de un elemento mecánico que esté sometido a fatiga puede ser calculado por la suma del tiempo que transcurre hasta que aparece la grieta (período de incubación) más el tiempo o período necesario para que la grieta se propague hasta que salga a la superficie y se forme el cráter.

$$N = N_f + N_i \quad (1)$$

Donde:  $N$  es el número total de ciclos hasta la rotura,  $N_i$  es el número de ciclos hasta que aparece la grieta,  $N_f$

es el número de ciclos durante la propagación de la grieta hasta la rotura.

Uno de los materiales que en la actualidad están sometidos a este tipo de sollicitud de carga, y es objeto de estudio en este trabajo, es la Fundición Nodular. Esta se utiliza por sus ventajas: temperatura de vertido menor que la del acero, propiedades mecánicas similares, fácil maquinabilidad, capacidad de autolubricación, baja sensibilidad a defectos superficiales, etc.

## 2. Iniciación de grietas bajo cargas de contacto.

El inicio de una grieta por fatiga representa una de las más importantes etapas en el proceso de formación del pitting. La posición y forma de iniciación de la grieta dependen de la microestructura del material, del tipo de carga aplicada y de la geometría de la pieza. Las grietas pueden ser iniciadas en la superficie o debajo de esta, en dependencia de las condiciones de contacto. En el caso del hierro nodular la formación del pitting está condicionada por la presencia del grafito tanto en la superficie como debajo de esta [2].

Cuando el pitting surge de un nódulo que está en la superficie, el cráter que aparece es prácticamente de la misma magnitud del nódulo. Si se propaga una grieta que parte de un nódulo ubicado debajo de la superficie, el tamaño del cráter es considerablemente mayor.

En fatiga de contacto las tensiones se distribuyen en la superficie y debajo de esta, las mismas pueden ser normales o tangenciales. En el caso de las tangenciales, su máxima intensidad se alcanza a una determinada distancia de la superficie y es en ese lugar precisamente donde se originan las grietas que luego crecen hacia la superficie formando un determinado ángulo. La profundidad donde aparecen las máximas tensiones tangenciales va a depender de las propiedades del material, de la magnitud de las cargas y de las condiciones del contacto. El surgimiento de la grieta de fatiga a partir del nódulo puede ocurrir sin que exista deformación de este, (caso donde las tensiones no sobrepasan el límite elástico del material) o cuando el nódulo se deforma debido a la presencia de tensiones que sobrepasan el límite elástico.

Cuando la grieta es iniciada en el área de máximas tensiones subsuperficiales, el mecanismo de iniciación de la grieta es a menudo atribuido al movimiento de las dislocaciones a lo largo de las bandas de deslizamiento, límites de grano o en la interfase de una inclusión [3].

En este trabajo se utiliza la teoría de iniciación de grietas a partir de la interfase de una inclusión con un material homogéneo. La inclusión en este caso sería el nódulo de grafito y el lugar de inicio de la grieta, la interfase de este con el metal base.

Para el estudio del efecto que genera la presencia de una inclusión de grafito en el material que la rodea, se

parte del criterio desarrollado por Griffith [4] al introducir en el material una discontinuidad o grieta que en su caso considera de forma elíptica. Para el caso que nos ocupa se asume que la longitud de la elipse concuerda con el diámetro del nódulo de grafito. (las tensiones no sobrepasan el límite elástico del material).

Se admite que la grieta se propagará si la disminución de la energía elástica resultante del aumento de la longitud de esta es mayor que el incremento de la energía superficial debido al aumento del área de la superficie de la grieta. El cálculo de la energía de deformación se determina utilizando la expresión dada por Petch [4] que para el caso de las tensiones tangenciales quedaría de la siguiente forma:

$$Wd = \frac{\pi R^2 \tau^2}{G} \quad (2)$$

Donde:  $C$  es la semilongitud del defecto,  $\tau$  tensión tangencial,  $G$  módulo de elasticidad tangencial

El incremento  $\Delta Wd$  en cada ciclo de carga es obtenido sustituyendo las tensiones tangenciales por  $\Delta\tau = \tau_{\max} - \tau_{\min}$  y por  $2\tau_f$  que es la resistencia del material al movimiento de las dislocaciones. Entonces la expresión (2) quedaría de la siguiente forma:

$$Wd = \frac{\pi R^2 (\Delta\tau - 2\tau_f)^2}{G} \quad (3)$$

El número de ciclos necesarios para el inicio de una grieta en la interfase metal inclusión puede ser determinado por la siguiente expresión [5].

$$N_i \cdot \Delta Wd = 4 \pi \cdot \rho \cdot S \quad (4)$$

Donde:  $N_i$  es el # de ciclos hasta que se inicia la grieta,  $S$  energía de fractura por unidad interfacial de área y  $\rho$  radio de la inclusión en el eje de mayor magnitud.

Para el cálculo del número de ciclos, donde se considera como basamento del surgimiento de grietas el movimiento de las dislocaciones, es necesario tener en cuenta que las mismas después que se agrupan son irreversibles. En concordancia con esto, el número de ciclos debe ser afectado por el coeficiente de irreversibilidad  $f$ . Sustituyendo (3) en (4) se obtiene la siguiente expresión:

$$N = \frac{4\rho SG}{C^2 (\Delta\tau - 2\tau_f)^2} \frac{2-f}{f} \quad (5)$$

En caso de que la inclusión tenga la forma esférica  $\rho$  es igual a  $C$ , la expresión (5) queda de la siguiente forma.

$$N_i = \frac{4GS}{R (\Delta\tau - 2\tau_f)^2} \frac{2-f}{f} \quad (6)$$

### 3. Propagación de una grieta de fatiga bajo cargas de contacto.

La propagación de la grieta por fatiga constituye la segunda y última etapa en el proceso de rotura por fatiga. En esta etapa se propone el uso de la expresión de Paris-Erdogan que relaciona la velocidad de propagación de una grieta  $dN/dc$  con las constantes del material  $A$  y  $m$ , así como con el factor de intensificación de tensiones  $\Delta K$ .

$$N_f = \int_{c_0}^{c_f} \frac{dC}{A\sigma_a^m} \left( \frac{\cos\left(\frac{\pi C}{W}\right)}{\pi C} \right)^{\frac{m}{2}} \quad (7)$$

Aplicando integral de la ecuación (7) y resolviendo este utilizando el MatLab se obtiene una expresión capaz de determinar el número de ciclos hasta la rotura.

$$N_f = \frac{1}{A(\sigma_o \sqrt{\pi c} \cos \beta)^p} \quad (8)$$

Para el cálculo del factor de intensificación de tensiones ( $\Delta K$ ), se utiliza la expresión de Murakami [6]. Aquí es preciso establecer ciertas consideraciones geométricas durante la acción de las cargas de contacto sobre la superficie del sistema nódulo de grafito – superficie de la muestra.

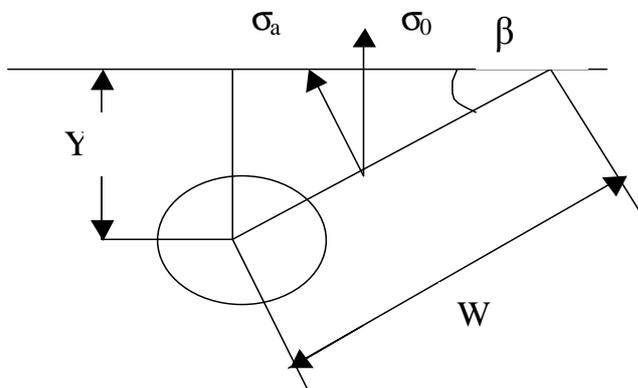


Fig. 1 Consideraciones geométricas entre un nódulo y la superficie.

En este caso  $\sigma_a$  es la tensión normal aplicada sobre la superficie de la grieta,  $W$  es la distancia que recorre la

grieta hasta que sale a la superficie y  $C$  es la longitud de la grieta en su recorrido.

De la Fig. 1 se determina  $W$  y el valor de la tensión normal en la superficie de la grieta ( $\sigma_o$ ).  $\sigma_o$  es la tensión en la superficie de la muestra. ( $Y$ ) es la profundidad donde las tensiones son máximas.

### 4. Modelación del Mecanismo de Fractura.

Se considera que el nódulo de grafito es un defecto hueco en forma de esfera, teniendo en cuenta que la resistencia del grafito es muy baja con relación al metal base. Se considera que la geometría de los defectos es uno de los factores que más influye en la fractura de cualquier material. Su cambio producto de la acción simultánea del cambio de carga, profundidad o tamaño inicial de nódulo se analiza y modela en este trabajo.

Los mayores esfuerzos tangenciales aparecen a una determinada profundidad, la cual depende de la carga aplicada y a la semianchura de contacto. Esta es la responsable de la iniciación y propagación de la grieta. Para analizar los valores de profundidad, se analizaron diferentes cargas de 80, 150, 300 y 450 MPa. Para nuestras condiciones, se trabajan las expresiones de Hertz, donde se considera un diámetro fijo de 50 mm, y el valor de  $\eta_1 = \eta_2 = 5.47 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$  la ecuación queda:

$$a = 0.784 \left( 10.94^{-6} \right) \left( \frac{D_1 D_2}{D_1 + D_2} \right) P_0 \quad (9)$$

Luego de esta expresión, conociendo que la profundidad donde aparecen las máximas tensiones tangenciales es  $s = 0.638 a$ , ya se puede determinar los valores de profundidad. Se consideran los valores de profundidad para el análisis los casos más peligrosos, o sea donde aparecen las máximas tensiones tangenciales. En la Tabla 1 aparecen los valores de carga, tamaño de nódulo y profundidad que se utilizarán en el estudio y la modelación.

### 5. Procedimiento de simulación por el método de elementos finitos con el ALGOR.

Se procedió al análisis mediante la concepción del modelo geométrico, simulando el material estudiado. Luego mediante el software ALGOR, se trabajaron los diferentes casos de carga, profundidad, diámetro de contacto y tamaño de nódulo. Dentro de las condiciones necesarias para el trabajo del software, se decide trabajar con el modelo de elemento finito 2-D, con un espesor de 0.02 mm, cuadrado de arista 1mm en el cual el agujero que representa el nódulo se encuentra dentro. Ver Fig. 2.

Tabla 1. Valores utilizados en la modelación.

Factor analizado.	Valores.
Diámetro de Contacto (mm)	100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000
Diámetro del nódulo (mm)	0.010, 0.012, 0.014
Profundidad ( $\mu\text{m}$ )	5.47, 10.94, 21.69, 32.82, 43.77, 54.71, 65.65, 76.6, 87.54, 98.48, 109.42
Carga Aplicada (MPa)	80, 150, 300, 450

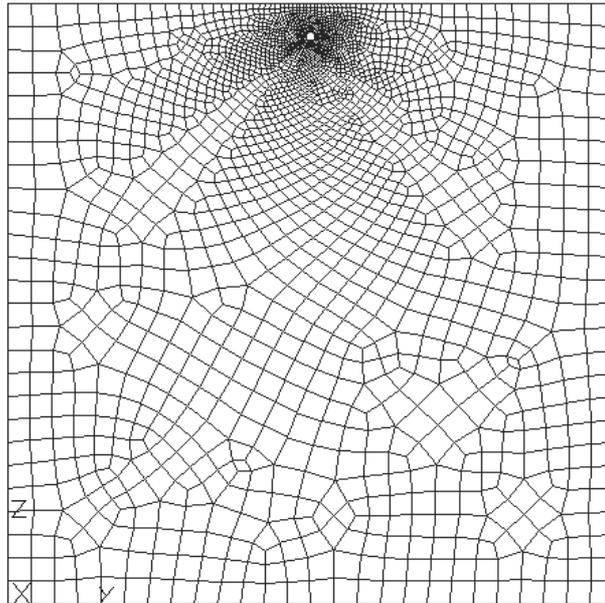


Fig. 2. Modelo geométrico y mallado generado por el ALGOR.

El mallado del modelo se realiza de forma automática por el software. Se realiza un análisis de convergencia, y se decide trabajar con un número de elementos entre 1800 y 3200 elementos.

## 6. Resultados de la simulación por el método de elementos finitos con el ALGOR.

Luego de realizar 99 simulaciones con los diferentes valores de carga, tamaño de nódulo, diámetro de contacto y profundidad, se obtuvieron como resultados de la modelación la variación de los parámetros geométricos del nódulo de grafito. Estos resultados se obtuvieron producto de mediciones realizadas en el ALGOR, además de calcular el radio en la punta del nódulo por la expresión

$$R = b^2/a \quad (10)$$

Donde **b** es el eje menor de la forma elíptica que alcanza el nódulo, y **a** el eje mayor.

A continuación, se introdujeron estos valores obtenidos dentro del sistema STATGRAPHICS, para obtener un modelo numérico, mediante una regresión múltiple.

Estos modelos se obtuvieron con un 95% de nivel de confianza, y coeficientes de regresión de un 99% para cada caso. Como resultado interesante de un análisis de varianza y del propio análisis de regresión se obtiene que algunas variables no influyen significativamente en el modelo.

Los modelos obtenidos fueron los siguientes:

$$C = -16.28 \cdot 10^{-6} + 1.0011d \quad (11)$$

$$\rho = 69.8854 \cdot 10^{-6} + 0.99d \quad (12)$$

Donde,

C semilongitud del nódulo de grafito [mm]

$\rho$  radio en la punta de la grieta [mm]

d diámetro del nódulo

### 7. Ejemplo numérico.

Para determinar el numero de ciclos en la formación del pitting se utilizaron los resultados obtenidos en las pruebas de fatiga de contacto de un hierro nodular austemperado [7].

En el caso del cálculo del número de ciclos para la iniciación de la grieta (Ni) se parte de los siguientes datos:  $G = 80000 \text{ N/mm}^2$ ,  $\Delta\tau = 900$  y  $680 \text{ N/mm}^2$ , estos valores de  $\Delta\tau$  fueron determinados utilizando las expresiones de Hertz [8]. Para la energía de formación de la grieta, para el factor de irreversibilidad y la resistencia al movimiento de las dislocaciones en el hierro se tomaron los siguientes valores  $S = 0.01 - 0.001 \text{ N/mm}^{-1}$ ,  $f = 10^{-3} - 10^{-4}$ ,  $\tau f = 25 \text{ N/mm}^2$ . En el caso del diámetro del nódulo, se consideró como el radio promedio del nódulo de grafito que es igual a  $0.012 \text{ mm}$ .

En el cálculo del número de ciclos durante la propagación de la grieta hasta la formación del pitting (Nf) se utilizó la expresión (8). Para su solución se determinaron los siguientes datos:  $A = 1.2 \times 10^{-12}$ ,  $p = 2.67$  según resultados experimentales [9].  $C_0 = 0.012 \text{ mm}$ , que en este caso es el diámetro del nódulo.  $Cf = W = 1.83 - 2.43 \text{ mm}$  que se determina por la expresión (11).  $Y = 0.77 - 1.02 \text{ mm}$ , se calcula por las funciones de Hertz. El valor de  $B$  se asume  $25^0$  según los resultados experimentales [7]. La tensión normal a la superficie de la grieta  $\sigma a = 200, 250, 300, 350, 400, 450 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_0$  se calcula por Hertz según los resultados experimentales del ensayo de fatiga de contacto del hierro nodular austemperado [7]. Para el cálculo del número de ciclos

totales hasta la rotura se utilizó la expresión (1). Los resultados son mostrados en la Tabla 2 y la Fig.3.

Tabla 2 Resultados del número de ciclos totales.

Carga Aplicada	$\tau$ máximo	Numero de Ciclos Totales.
200 MPa	67 MPa	56411901
250 MPa	84 MPa	18921286
300 MPa	100 MPa	13271836
350 MPa	117 MPa	10304320
400 MPa	134 MPa	8381357
450 MPa	150 MPa	5985924

Como se puede apreciar, los resultados que se muestran se corresponden con el comportamiento de un material ferroso, como se expone en la bibliografía consultada.

### 8. Conclusiones

- El diámetro del nódulo de grafito tiene una influencia significativa en la rotura del ADI.
- Se obtuvo una metodología para predecir la formación del pitting en un hierro nodular austemperado., la cual puede ser utilizada para predecir la formación de grietas y predecir la vida útil de elementos construidos de hierro nodular austemperado sometido a fatiga de contacto.
- Los resultados obtenidos por la metodología propuesta se ajustan de manera adecuada a los resultados expuestos en la bibliografía consultada.

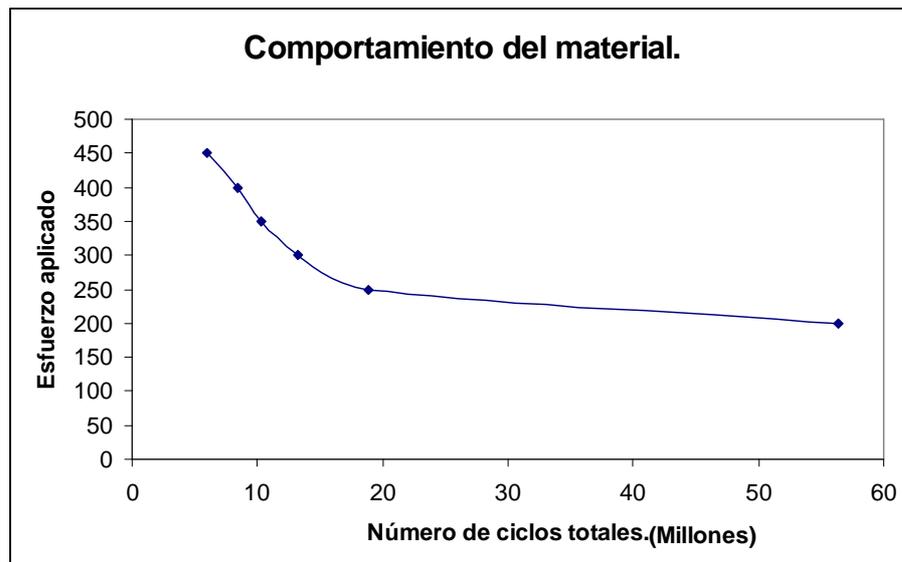


Fig. 2 Comportamiento del material, resultado de la metodología obtenida.

## 9. Bibliografía.

1. Callister. W. Materials Science and Engineering. 1992, pp 345.
2. Dommarco.R.C. Rolling contact fatigue (RCF) Resistance of Austempered Ductile Iron (ADI), 1998, pp 69-74.8.
3. Glodez. S. Surface fatigue of gear teeth flanks. Computer and Structures, 73, 1999, pp 475 483.
4. Chalmers. B. Metalurgia Física. 1962, pp 187-205.
5. Tanaka. K. A theory of fatigue crack initiation at inclusion. Metallurgical Transaction, 1982, 13A, 117, 23.
6. Prado. J. M. Dry sliding wear of austempered ductile iron. Materials Science and Technology. The Institute of Materials. 1995. pp340-448.
7. Figueroa. C. Estudio experimental sobre el comportamiento del hierro austemperado nitrurado (ADI) a la fatiga de contacto. Congreso Cubano de Ingeniería Mecánica. CH. 2000.
8. Boresi. A P. Advanced Mechanics of Materials. 1993, 811, p6.
9. Houbaert Irmen. Y. Fundamentos del comportamiento mecánico de los materiales metálicos. Universidad de Gante. 1994.

---

## Considerations on the contact fatigue failure in the austempered nodular iron.

### Abstract.

The present paper deal with the failure of contact fatigue in the autempered ductil iron considering the graphite nodules variation as an important factor in th calculation of the number of cycles nedded for pitting, starting from theoretical considerations, developing a methodology for the calculation. The influence of load variation is analyzed, the values of the contact diameters, the size of graphite nodules, the depth where the nodule appears in the geometry of the nodule, are important factors in the initiation and propagation of contact fatigue cracks. It is considered the depths in wich the maxims tangential tensions appear, which were obtained by Hertz expressions. An analysis by the method of finite elements with a proffesional software was carried out obtaining the best mesh for a convergence analysis and a regression analysis with STATGRAPHICS, in order to obtain numeric models that related the signal parameters.

**Key words: Contac Fatigue, Fracture, Cracks, Graphite Nodule, Finite Elements.**