



## **EVALUACION DEL CRECIMIENTO DE UNA FISURA EN UNA HORQUILLA MEDIANTE TECNICAS COMPUTACIONALES**

**Guillermo Ortiz – Sebastián Barrera**

Directores:

Massimo Bressan – Verónica Drago

Centro de Investigación y Desarrollo en Mecánica - Instituto Nacional de Tecnología Industrial  
Avenida General Paz 5445 – B1650WAB – San Martín – Buenos Aires - Argentina

E-mail: gortiz@inti.gob.ar

### **RESUMEN**

*En el presente trabajo se evaluó el crecimiento de una fisura en una horquilla de acero, de uso en bicicletas y de tipo rígida, sometida a cargas cíclicas hasta llevarla a la rotura.*

*Experimentalmente se realizó un ensayo de fatiga basándose en la configuración de ensayo propuesta en la Norma IRAM 40020-1997. Asimismo, el seguimiento de la propagación de la fisura se relevó mediante paradas intermedias en las cuales se midió la longitud de fisura a través de ensayos no destructivos.*

*Por otra parte, empleando la técnica de los Elementos Finitos, se obtuvo el estado de tensiones del componente, a partir del cual se determinó el sitio más probable de inicio de la fisura.*

*Luego, empleando la técnica computacional de Elementos de Borde, se evaluó al componente bajo diferentes modelos de crecimiento de fisura (Paris, Forman, Rhodes, Walker Chang).*

*Finalmente se compararon los resultados obtenidos de estas últimas simulaciones con los del ensayo experimental.*

*De los análisis realizados, se determinó el modelo de crecimiento de fisura simulada que mejor se ajusta a lo observado experimentalmente. A partir de este resultado, se pretende evaluar y validar el uso de técnicas computacionales para tratar el crecimiento de fisuras en estos componentes.*

**PALABRAS CLAVE:** Horquilla – Fractura - Fatiga (hasta tres palabras clave).

### **1. INTRODUCCIÓN**

El presente trabajo se vincula directamente con los ensayos realizados en INTI para la certificación de bicicletas y la aplicación de métodos computacionales, siendo ésta la continuación del trabajo presentado anteriormente por personal de Centro de Investigación y Desarrollo en Mecánica, donde se evaluó la resistencia estructural de la horquilla[1].

Se tomó como base la norma IRAM 40020 [2], la cual fija los requisitos de seguridad en las bicicletas, y dentro de las evaluaciones de las horquillas establece un ensayo de fatiga. Dicho ensayo es llevado a cabo por el Centro de Investigación y Desarrollo en Mecánica y para el presente trabajo se involucraron diferentes laboratorios del centro.

Dentro de las tareas desarrolladas en el laboratorio de Fractura y Fatiga del mismo centro, se realizan tareas relacionadas con mecánica de la fractura y simulación computacional. El objeto del trabajo es presentar uno de los tantos usos que tiene la mecánica computacional como complemento de ensayos experimentales.

Resulta de interés la simulación del crecimiento de la fisura bajo diferentes leyes de crecimiento y contrastarla con los resultados experimentales, y de esa manera, evaluar el uso de las técnicas computacionales en este tipo de componentes.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Material, equipo y softwares

Para realizar el ensayo experimental se utilizó una horquilla de acero rígida de uso en bicicletas y fue ensayada en una máquina mecánica Turner Bros.

Para la simulación por elementos finitos se utilizó la versión RESEARCH de ABAQUS 6.9.

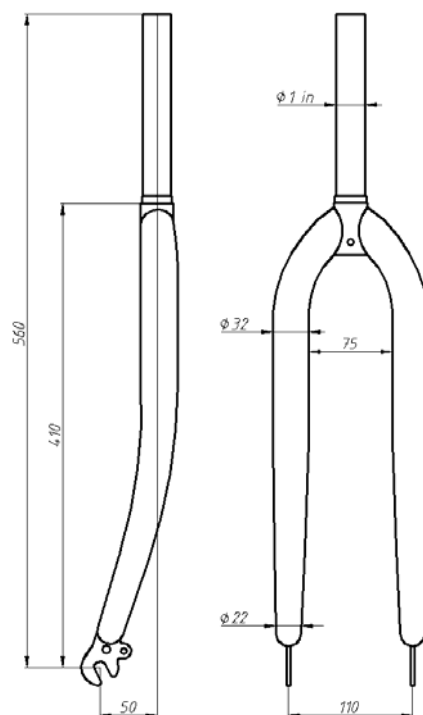
Para la simulación por elementos de borde se utilizó la versión académica de BEASY v10 r12.



**Fotografía 1.** Máquina de ensayo de fatiga para horquilla

### 2.2 Muestra

Las dimensiones de la horquilla fueron relevadas mediante un calibre para luego dibujarla en CAD para sus posteriores simulaciones. A continuación se presenta un esquema con sus dimensiones principales



**Figura 1.** Esquema de la horquilla analizada

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Desplazamientos y Rigidez estática

Para este trabajo llamamos  $\delta$  al desplazamiento, medido en mm, que produce la carga de 440 N establecida en la norma, aplicada en los extremos de la horquilla, medido en la dirección de aplicación de la carga. Con el dato del desplazamiento y la carga aplicada es posible calcular la rigidez estática K medida en N/mm.

Además con los datos de desplazamiento aportados por la simulación por elementos finitos también calculamos la rigidez estática. A continuación se presenta la tabla con los resultados.

**Tabla 1.** Desplazamientos y Rigidez Estática

$\delta_{exp.}$ (mm)	$\delta t$ (mm)	$K_{exp.}$ (N/mm)	$Kt$ (N/mm)
4,8	5	91,7	88

#### 3.2 Ensayo de fatiga de la horquilla

En el ensayo que establece la norma, la horquilla se fija a un dispositivo soporte que simula el caño frontal del cuadro. Una fuerza alternativa de 440N se aplica sobre el eje en el plano de la rueda y perpendicular al caño del portamanubrio, durante 50.000 ciclos, a una frecuencia de ciclado aproximada de 2 Hz, no debiéndose producir fisuras ni fracturas (Ensayo 2.5.2) [2].

Para nuestro estudio además de los 50.000 ciclos se continuó con el ciclado, de manera de obtener la rotura del componente.

Se fue relevando la cantidad de ciclos necesarios hasta iniciar la fisura y luego con paradas intermedias se midió la longitud de la fisura hasta que se produjo la rotura final.

Fue utilizado el método recomendado en la norma británica BS 6835 donde podemos obtener  $dA/dN$  de la siguiente expresión [3]:

$$\frac{dA}{dN} \cdot l = \frac{a_{i+1} - a_{i-1}}{N_{i+1} - N_{i-1}}$$

Donde, se toman los valores anteriores y posteriores al punto donde se calcula el  $\Delta K$ , en cada punto i.

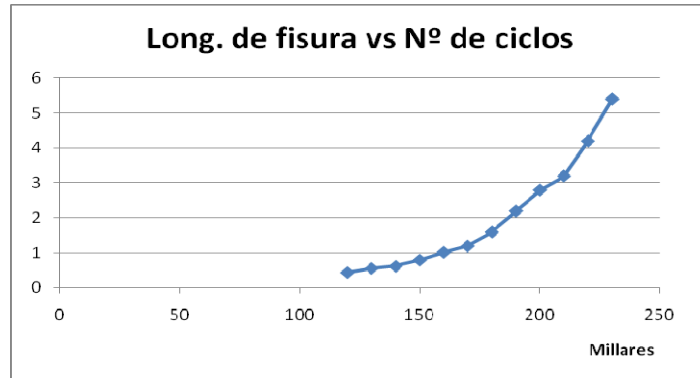
Como práctica estándar de este ensayo se le realiza a la horquilla la técnica de partículas magnetizables, antes y después de los 50000 ciclos.

A continuación se presenta la tabla con las mediciones de fisura y las paradas intermedias:

**Tabla 2.** Mediciones de fisura y n° de ciclos

a (mm) Long de fisura	a/2 (mm)	N N° de ciclos
0,44	0,22	120000
0,56	0,28	130000
0,62	0,31	140000
0,8	0,4	150000
1,02	0,51	160000
1,2	0,6	170000
1,6	0,8	180000
2,2	1,1	190000
2,8	1,4	200000
3,2	1,6	210000
4,2	2,1	220000
5,4	2,7	230000

Las longitudes de fisura fueron resultado de un promedio entre mediciones por extensómetro y un calibre de taller. La precisión fue de  $\pm 0.1$  mm. Paralelamente se relevó mediante partículas magnetizables y con fotografías pudo verse el avance de la fisura.



**Gráfico 1.** Longitud de fisura (mm) vs N° de ciclos (millares)

### 3.3 Simulación numérica por elementos finitos (FEM)

La simulación por elementos finitos nos permitió conocer el estado tensional de la horquilla.

A su vez nos permite identificar el lugar más probable de inicio de fisura. En principio este lugar sería donde se tiene el mayor valor de tensión.

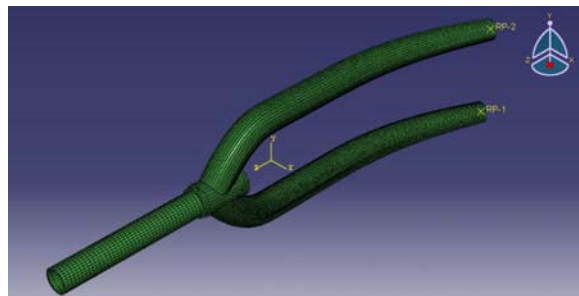
El análisis por elementos finitos se realizó considerando la carga periódica, la frecuencia en el ciclado, la carga aplicada de 440 N en los extremos de la horquilla.

Se realizaron 2 simulaciones por elementos finitos. La primera sirvió para identificar la zona más probable de inicio de fisura. Luego se realizó una simulación de la mitad de la horquilla (siempre teniendo en cuenta el cambio en las condiciones de borde) que permitió una mayor densidad en el mallado para mejor identificación del nodo de inicio de fisura y un mejor modelo para ser tratado posteriormente en el software de elementos de borde.

Para realizar las simulaciones se consideraron los siguientes parámetros:

**Tabla 3.** Parámetros utilizados en la simulación FEM

E (Módulo de Young) [MPa]	$\nu$ (Coeficiente de Poisson)	Límite de Fluencia [MPa]
210000	0.3	311



**Figura 2.** Horquilla entera mallada

**Tabla 4.** Características de las mallas de elementos finitos

Modelo	Nodos	Elementos
Horquilla entera	52870	34808
Media horquilla	146780	601210

De la simulación se desprende que el inicio más probable se dará en el nodo 26868 donde el valor de tensión de Von Mises es 273 MPa.

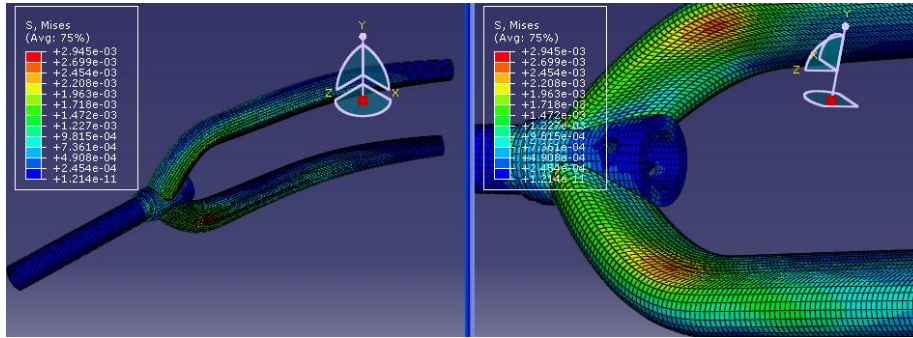


Figura 3. Tensiones de Von Mises para la horquilla entera



Figura 4. Media horquilla mallada

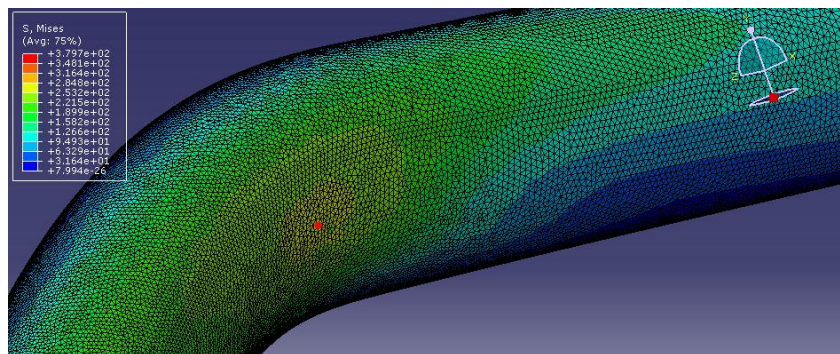


Figura 5. Tensiones de Von Mises para la media horquilla

### 3.4 Simulación numérica por Elementos de Borde (BEM)

Se trabajó con un software específico para crecimiento de fisura que se basa en el método de elementos de borde para su operación.

Dentro de las opciones que presenta el programa se puede especificar las diferentes leyes de crecimiento dentro de la zona estable de crecimiento. En el presente trabajo se analizaron las siguientes:

- Ley de Paris

$$\frac{dA}{dN} = C(\Delta K)^n$$

- Ley de Forman

$$\frac{dA}{dN} = \frac{C(\Delta K)^n}{(1-R)K_c - \Delta K}$$

- Ley de Rhodes

$$\frac{dA}{dN} = \frac{C(\Delta K)^n}{(1-R)^{n-2} - \Delta K \left\{ 1 - \left[ \frac{\Delta K}{(1-R)K_c} \right]^p \right\}}$$

- Walker-Chang

$$\frac{dA}{dN} = \frac{C(\Delta K)^n}{(1-R)^{(1-m)}}$$

Siendo,

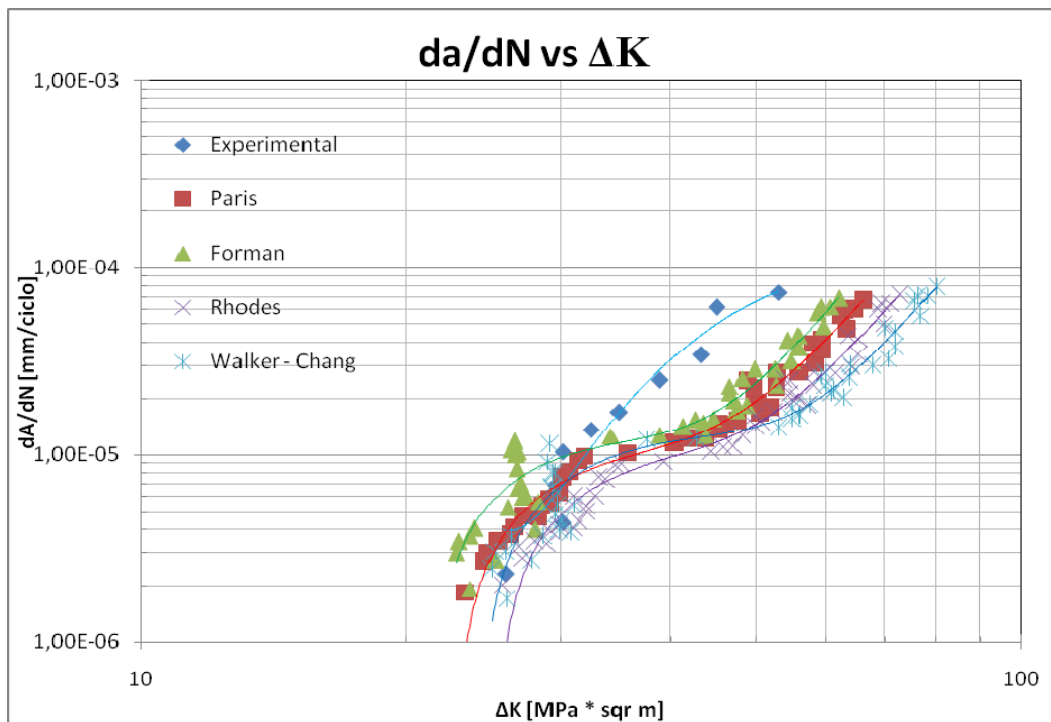
$\frac{dA}{dN}$  la tasa de crecimiento de la fisura,  $C$  y  $n$  constantes que dependen del material,  $\Delta K$  la variación del factor de intensidad de tensiones,  $R$  el índice de reversibilidad,  $K_{IC}$  el factor de intensidad de tensiones crítico,  $m$  y  $p$  valores experimentales que dependen del material. [4]

**Tabla 5.** Parámetros utilizados en la simulación BEM

E (Módulo de Young) [MPa]	v (Coef. de Poisson)	Límite de Fluencia [MPa]	$R = K_{min} / K_{max}$	C	n	P	m	$K_{IC}$ [MPa]	$K_C$ [MPa]
210000	0,3	311	-1	$1,515 \times 10^{-14}$	3,6	0,5	0,7	1737	2605,48

En el Gráfico 2 se presentan superpuestas las curvas de tasa de crecimiento de fisura ( $da/dN$ ) vs la variación del factor de concentración de tensiones ( $\Delta K$ ) para el ensayo experimental y las diferentes leyes de crecimiento simuladas:

De las curvas vemos que en un inicio todas las simulaciones salvo la de Forman se ajustan muy bien al ensayo experimental. A medida que el  $\Delta K$  aumenta las simulaciones de Forman y Paris son las más cercanas a los valores experimentales.



**Gráfico 2.**  $da/dN$  vs  $\Delta K$

#### 4. CONCLUSIONES

Con el presente trabajo se evaluó la capacidad de incorporar a los ensayos que realiza el Centro de Mecánica de INTI un estudio de fractomecánica mediante el uso de softwares específicos.

Para ello se simuló bajo diferentes leyes de crecimiento de fisura una horquilla contrastando los resultados con lo obtenido de un ensayo experimental. Debemos tener presentes las limitaciones o

errores que podría introducir la adquisición de datos así como también la particularidad del presente trabajo donde sólo se evaluó experimentalmente una horquilla.

De este trabajo se desprende que de todas las simulaciones realizadas la que mejor se ajusta al ensayo experimental es la de Paris, siendo además (por su simplicidad) la que demanda menor tiempo de cálculo.

Queda como trabajo posterior estimar la vida útil del componente mediante el uso de técnicas computacionales.

## **REFERENCIAS**

- [1] D.M. Khramer et al., “Evaluación resistencial de horquillas de bicicletas de uso público mediante el uso de técnicas experimentales y de simulación computacional”; SAM/CONAMET, 2005.
- [2] IRAM 40020, Bicicletas, Requisitos de seguridad, Diciembre 1997.
- [3] L. Pook, “Linear Elastic Fracture Mechanics for Engineers – Theory and Applications”; 2000, WIT Press.
- [4] Beasy User Guide, Computational Mechanics BEASY Ltd, Southampton; 2008.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece la colaboración de los distintos laboratorios de INTI Mecánica que participaron en la realización, corrección y aportes al presente trabajo.