

NUEVAS METODOLOGÍAS PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE UNIONES SOLDADAS

Leandro F. Jaureguizar^a, Andres Martinez del Pezzo^b, Mirco D. Chapetti^a

*^aGrupo de Mecánica Experimental MEX, División Soldadura y Fractomecánica
INTEMA - CONICET – Universidad Nacional de Mar del Plata.
Av. Juan B. Justo 4302, B7608FDQ Mar del Plata, Argentina.*

E-mail autor responsable: mchapetti@fi.mdp.edu.ar

E-mail alternativo: ljaureguizar@fi.mdp.edu.ar

*^bUID – GEMA Grupo de Ensayos Mecánicos Especiales, Departamento Aeronáutica,
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata
Calle 116 e/47 y 48, 1900 La Plata, Argentina.*

Palabras claves: Fatiga, Uniones Soldadas, Predicción

Resumen: Los métodos tradicionales de diseño de componentes soldados se basan fundamentalmente en el uso de las curvas de Wöhler o curvas S-N, (Tensión nominal o estructural vs. número de ciclos a falla), donde la tensión que se utiliza como parámetro de diseño es una tensión nominal o equivalente aplicada a la configuración analizada. Mediante el uso de estos parámetros nominales no es posible estudiar la influencia de parámetros geométricos del cordón, de las imperfecciones y/o defectos que el proceso de soldadura introduce en la pieza y del material base, ya que estos diagramas se encuentran catalogados según el tipo de junta y solo diferencian entre acero y aluminio.

El presente trabajo trata sobre el desarrollo de nuevas metodologías fractomecánicas que permiten estudiar y predecir el comportamiento a fatiga de componentes metálicos y su aplicación a juntas soldadas. En esta nueva metodología el comportamiento a fatiga es estudiado utilizando el concepto de curva de resistencia, la que permite estimar la velocidad de propagación de fisuras en todo su rango de longitud, incluyendo el período de fisuras cortas. El concepto de curva umbral de propagación permite además definir umbrales nominales de fractura por fatiga.

En particular se presenta una metodología experimental dedicada, que permite detectar y monitorear la evolución del daño por fatiga en uniones soldadas. Esto es necesario para complementar el estudio numérico asociado a la aplicación de la nueva metodología de análisis.

El trabajo se complementa con un resumen de la metodología numérica y su habilidad para cuantificar la influencia de diferentes variables geométricas asociadas a la configuración estudiada.

1 INTRODUCCIÓN

La falla por fatiga de uniones soldadas ocurre generalmente por la iniciación y posterior propagación de fisuras con origen en los concentradores de tensión existentes en los talones de las soldaduras. Estas discontinuidades y defectos son resultado del proceso de soldadura utilizado y es a partir de ellas que se generan pequeñas fisuras a lo largo del talón. El mayor problema relacionado con el estudio de este fenómeno está dado por la distribución aleatoria de dichos defectos. Los factores más importantes que afectan la generación de fisuras están dados por el tipo y distribución de los defectos, la micro y macrogeometría del talón, las tensiones presentes, tanto aplicadas como residuales, el efecto de concentración de tensiones generado por la presencia del cordón de soldadura y las propiedades del material utilizado (Chapetti et al 2004).

Los métodos tradicionales utilizados para el diseño de componentes soldados sometidos a fatiga se basan en el uso de curvas de Wöhler o curvas S-N que toman como parámetro de diseño una tensión nominal o equivalente aplicada a la unión bajo estudio. Entre los métodos más utilizados se encuentran: el método de la tensión nominal, Método de Hot Spot Stress, Método del Notch Stress, Método de la Deformación Local. La mayor parte de estos métodos se encuentra estandarizada en bibliografía o aceptados en recomendaciones internacionalmente. Los procedimientos para el diseño a fatiga se basan en una serie de curvas $\Delta\sigma - N$ obtenidas en base a una gran cantidad de ensayos de fatiga de amplitud constante de uniones soldadas, cuyo uso es regido por los métodos de clasificación de las reglas de diseño tomando la resistencia a fatiga para un determinado número de ciclos, (Jaureguizar et al 2007). El parámetro de diseño es una tensión nominal o equivalente aplicada a la configuración en estudio. La utilización de estos parámetros nominales impide estudiar la influencia de los parámetros geométricos del cordón, defectos generados por el proceso de soldadura, etc., ya que estos diagramas se encuentran catalogados solo según el tipo de junta y el material, (acero o aluminio).

Como las metodologías clásicas no se enfocan en las características geométricas o microestructurales de la unión en estudio, en los últimos años se ha promovido el desarrollo de nuevas metodologías de diseño basadas en la mecánica de fractura lineal elástica que permitan entender y estimar la influencia de las diferentes variables geométricas, microestructurales y mecánicas que intervienen en el comportamiento a fatiga de uniones soldadas y para esto deben contemplar el régimen de fisuras cortas. Este régimen contempla pequeñas fisuras de hasta aproximadamente 1 mm de profundidad y presenta un umbral de propagación de fisuras por fatiga que depende de la longitud de la fisura.

Los métodos fractomecánicos tradicionales utilizados para analizar la integridad de uniones soldadas consideran la vida total a fatiga de la unión como la dada por la vida a propagación de una fisura cuya longitud inicial está dada por el tamaño máximo de defecto que es considerado en el rango de 0,5-1 mm. En este caso, una curva $\Delta\sigma - N$ para una dada configuración puede ser calculada integrando la expresión de la ley de Paris. (Anderson T. L 1995):

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m. \quad (1)$$

Donde m y C son constantes que dependen del material y las condiciones del ensayo obtenidas del comportamiento de fisuras largas.

Sin embargo, las fisuras cortas presentan umbrales menores a velocidades de propagación más elevadas que las fisuras largas para la misma fuerza impulsora aplicada (ΔK).

El efecto de las fisuras cortas puede ser observado hasta una longitud de fisura que

depende de la relación de carga R, y puede estar en el rango de 0,5-1 mm para aceros estructurales (Suresh 1984),(Miller 1988). La metodología presentada por Chapetti en un trabajo previo, (Chapetti et al 1995) para el análisis del comportamiento de fisuras cortas estima el umbral de propagación por fatiga en función de la longitud de la fisura, ΔK_{th} , y de la velocidad de propagación de la fisura como la diferencia entre la fuerza aplicada, ΔK , y ΔK_{th} , a través de la siguiente expresión:

$$\frac{da}{dN} = C \left(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m \right) \quad (2)$$

En la [expresión \(1\)](#) el umbral de propagación es constante para una dada relación de carga, (R), mientras que en la [expresión \(2\)](#) es una función de la longitud de la fisura. Este método permite estimar la resistencia a fatiga comprendiendo fisuras iniciales con un tamaño equivalente al de la microestructura del material de la unión bajo estudio.

En éste trabajo se presenta una metodología experimental dedicada, desarrollada con el objeto de detectar y monitorear el crecimiento de fisuras tan pequeñas como 0,1 mm, iniciadas a partir de talones de soldadura bajo fatiga de alto número de ciclos. Ésta metodología experimental fue desarrollada con el objeto de validar la nueva metodología de análisis y predicción. Se resume además de la metodología de análisis, las tareas necesarias de cálculo numérico asociadas a la determinación de la fuerza impulsora en función de la longitud de fisura para una dada configuración geométrica y de carga, y resultados preliminares del análisis paramétrico de la influencia de algunas variables geométricas de la unión.

1.1 LA NUEVA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Considerando el efecto de las fisuras cortas, el umbral de propagación resulta una función de la longitud de fisura. En un estudio previo (Chapetti et al 2004) se obtuvo una expresión para la estimación de este umbral, haciendo uso solamente del límite de fatiga plano $\Delta\sigma_e R$, el umbral para fisuras largas ΔK_{thR} , y de dimensiones características microestructurales, d , (tamaño de grano):

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{dR} + (\Delta K_{thR} - \Delta K_{dR}) \left[1 - e^{-k(a-d)} \right] = Y \Delta\sigma_{th} \sqrt{\pi a} \quad a \geq d. \quad (3)$$

Donde ΔK_{dR} y k están dados por:

$$\Delta K_{dR} = Y \Delta\sigma_{eR} \sqrt{\pi d}, \quad (4)$$

$$k = \frac{1}{4d} \left(\frac{\Delta K_{dR}}{\Delta K_{thR} - \Delta K_{dR}} \right). \quad (5)$$

En la [Figura 1](#) se muestra esquemáticamente la curva umbral dada por la [expresión \(3\)](#) en términos del rango del factor de intensidad de tensiones, para una longitud de fisura inicial $a_i = d$, $\Delta K_{th} = \Delta K_{dR}$ y ΔK_{th} tendiendo a ΔK_{thR} para fisuras largas.

La expresión presentada para la estimación del umbral de propagación del material como una función de la longitud de la fisura permite definir el período de iniciación de la fisura como el número de ciclos necesario para obtener una fisura de longitud d , (iniciación de una microfisura), donde el comportamiento a propagación puede ser analizado. En el caso de una unión soldada, la presencia de defectos generalmente evita el período de iniciación de la fisura, y la longitud inicial para el período de propagación es tomada como el tamaño del

defecto máximo encontrado.

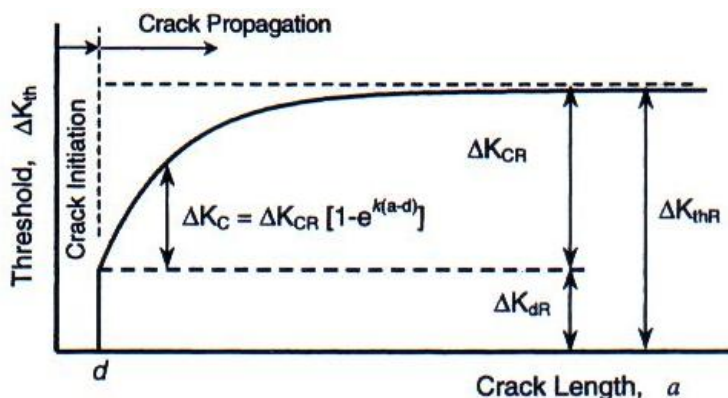


Figura 1: Curva umbral obtenida a partir de la [expresión \(3\)](#) en función del rango del factor de intensidad de tensiones.

1.2 ESTIMACIÓN DE LA VIDA A FATIGA DE UNIONES SOLDADAS A TOPE

La fuerza impulsora aplicada, ΔK , se relaciona con el rango de tensión aplicado, $\Delta\sigma$, y la longitud de la fisura, a , a través de la [expresión \(6\)](#), donde el parámetro Y es una función de la longitud de la fisura, de la geometría del componente y del tipo de carga aplicada.

$$\Delta K = Y \cdot \Delta\sigma_n \cdot \sqrt{\pi \cdot a} . \quad (6)$$

Para el cálculo de las curvas ΔK vs. a se propone un análisis haciendo uso de dos posibles técnicas. Una de ellas comprende la implementación de una expresión algebraica obtenida del ajuste de resultados experimentales mediante el método de las funciones de peso, metodología propuesta por [Chapetti, \(2004\)](#). La otra técnica comprende la implementación de modelos de elementos finitos, (FEM), correspondientes a la unión soldada. En esta línea, para la validación de los resultados obtenidos a través de la aplicación de la metodología fractomecánica presentada se hacen necesarios trabajos de modelado paramétrico que contemplen las distintas variables intervinientes, (concentradores de tensión, geometría del cordón de soldadura, geometría de la unión soldada, ángulo de sobremonta, etc.).

En la [Figura 2](#), se muestran resultados parciales obtenidos por [Del Pezzo A., \(2008\)](#), como parte de trabajos preliminares, resultado de la aplicación de FEM al estudio de la influencia del ángulo de sobremonta, espesor y tamaño de defecto inicial en la resistencia a fatiga de una unión soldada a tope. Se presentan también resultados experimentales presentados previamente por Gurney, estos últimos confirman la tendencia obtenida a través del modelado.

2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para la validación de los resultados teóricos obtenidos utilizando la nueva metodología propuesta se desarrolló una técnica experimental dedicada para la detección y el monitoreo de fisuras generadas a partir de talones de soldadura. La técnica está basada en el método de extensometría eléctrica, y fue inicialmente desarrollada para el análisis de fisuras de frente plano. La técnica fue luego generalizada a 3D haciendo uso de múltiples extensómetros permitiendo registrar la profundidad y la forma de la fisura,

([Chapetti et al 1997c, b,a](#)),([Wessel C. et al 2001](#)).

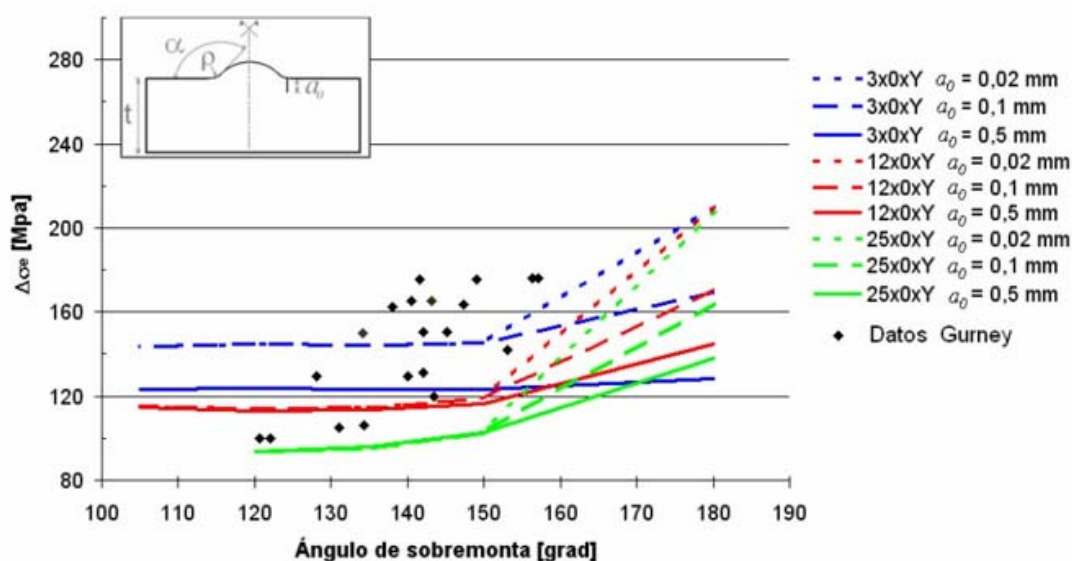


Figura 2: Los resultados obtenidos por FEM presentan misma tendencia que los obtenidos experimentalmente por Gurney, (Gurney 1978)

Cuando una fisura inicia y propaga dentro de un campo de tensiones (ver Figura 3a), las líneas de flujo de las tensiones presentes comienzan a separarse de la superficie debido a la discontinuidad generada (Wessel C. et al 2001). Esto puede ser detectado mediante extensómetros que son colocados en la superficie del material y a una distancia H de la boca de la fisura.

Cuando la fisura se abre, se presenta un cambio en la pendiente de la curva de respuesta obtenida en un grafico de deformación vs. Carga, Figura 3b. Esto implica que a medida que la fisura avance, la pendiente "P" correspondiente a la fisura abierta irá aumentando haciéndose mayor que la pendiente inicial obtenida al comienzo del ensayo, "P0". Este cambio de pendiente esta dado por la disminución en la rigidez de la probeta y no toma un valor puntual sino que se produce en forma continua desde la aplicación de la carga mínima hasta un valor de carga en el cual la fisura se encuentra totalmente abierta, (Chapetti 1995).

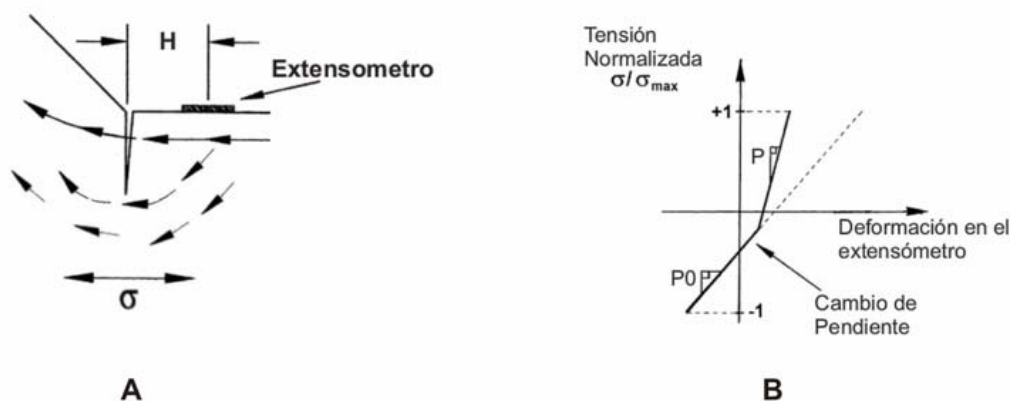


Figura 3. A) Influencia de la fisura sobre las líneas de flujo de tensión, B) Cambio en la pendiente P debido a la presencia y avance de la fisura.

A partir de una curva de calibración previa, [Figura 4a](#), obtenida a través datos experimentales, se calcula la longitud de fisura "a" para $H=1$, ([Chapetti 1995](#)). Desde el momento en que se detecta que la fisura tiene una longitud determinada se efectúan marcas con tintas penetrantes o marcas de playa, registrándose también el valor de la pendiente P para cada canal de extensometría. Esta operación se repite de forma sucesiva a medida que la fisura crece.

Una vez finalizado el ensayo, (se finaliza cuando la longitud de fisura alcanza una longitud determinada o se produce la falla de la unión), se registran "post mortem" las distancias H reales entre la fisura y cada uno de los extensómetros y se obtienen las verdaderas magnitudes de la longitud de fisura "a" haciendo uso de las marcas obtenidas a través de tintas penetrantes.

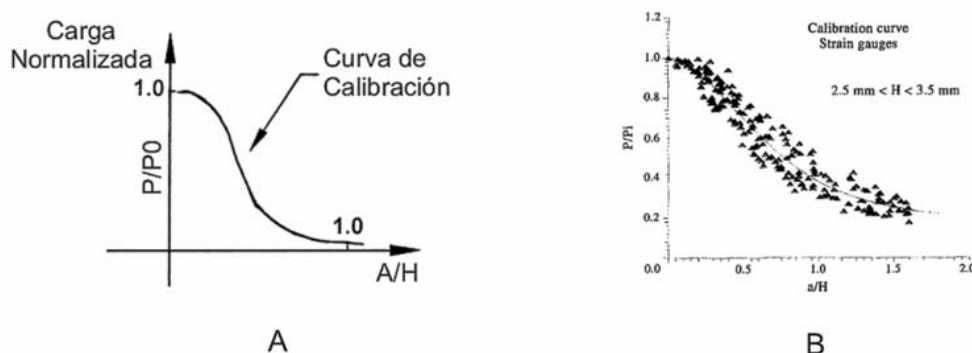


Figura 4. A) Curva de calibración previa obtenida para $H=1$, B) Curva de calibración obtenida por [Chapetti](#), ([Chapetti et al 1995](#))

Con esta información se generan pares de puntos $P/P0 - a/H$, los que permiten reajustar la curva de calibración inicial. Es importante destacar que esta calibración permite obtener la verdadera magnitud de "a" independientemente de las constantes elásticas del material así como de la calibración que se haya dado a cada uno de los extensómetros. En la [Figura 4b](#) se observa una curva de calibración obtenida por [Chapetti,\(1995\)](#) para valores de H comprendidos entre 2,5 y 3,5 mm.

La sensibilidad presentada por el método depende del valor de "H", o lo que es lo mismo, de la cercanía del extensómetro a la boca de la fisura. El rango de medición también es afectado por éste parámetro ya que cuando la longitud de fisura "a" sea cercana a "H" el extensómetro se satura. Aquellos extensómetros que sean colocados a distancias mayores de la fisura permitirán registrar mayores valores de "a", [Figura 5A](#) , ([Chapetti 1995](#)).

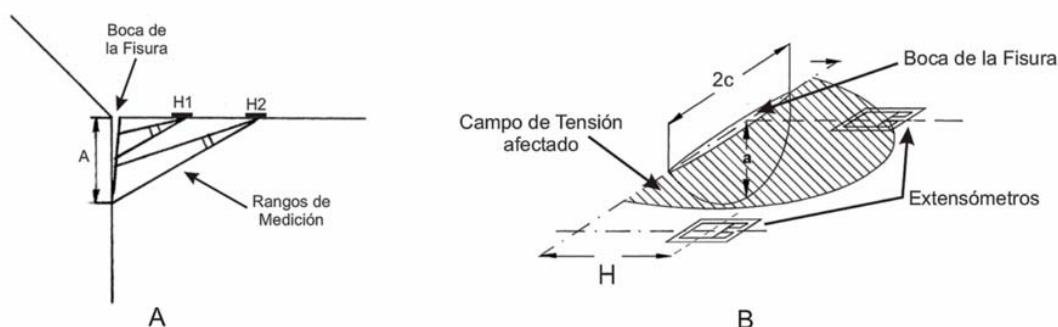


Figura 5. A) Rango de medición del extensómetro en función de la distancia H a la boca de la fisura, B) La presencia de la boca de la fisura afecta el campo de tensión local y extensómetros ([Wessel C. et al 2001](#)).

Otro factor que afecta la sensibilidad del sistema es la configuración adoptada por los extensómetros y por la fisura, a medida que esta crece. Considerando que el extensómetro presenta la mayor sensibilidad delante de su parte central podría darse el caso en que la fisura iniciara justo entre dos extensómetros, entonces hasta que esta crezca lo suficiente como para afectar a uno o dos extensómetros adyacentes no será detectada, [Figura 5b](#), o se registrará una magnitud distinta de la verdadera.

3 RESULTADOS EXPERIMENTALES

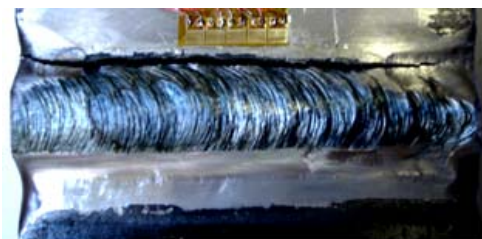
Para la implementación experimental se utilizó una máquina de ensayos de fatiga blanda, (Walking Beam), la cual permite la aplicación de cargas cíclicas a frecuencias comprendidas entre los 2,5 y 10 Hz. La prueba consistió en someter a flexión en tres puntos y con carga controlada una probeta del tipo Bead On Plate. Para su confección se utilizó un acero SAE 1010 de 8 mm de espesor, 53 mm de ancho y un SPAN de 180 mm, con un rango de tensiones aplicado de a una frecuencia de 10 Hz y $R = 0,23$. Esta última fue instrumentada con cinco extensómetros y especialmente acondicionada con el objeto de asegurarse que las fisuras se generen solo en el talón frente al que se colocaron los extensómetros.

Se obtuvieron puntos para la curva de calibración a través de la realización de marcas con tintas para longitudes de fisura de 500, 1000, 2000, 3000 micrones, siendo estos valores calculados por el sistema para $H=1$ mm. Finalizado el ensayo se obtuvieron registros "post mortem" de la longitud real de la fisura al momento de aplicar las tintas penetrantes, [Tabla 1](#).

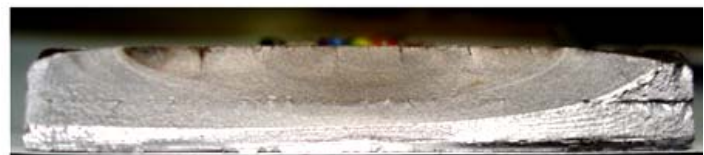
Estos valores fueron medidos en la zona correspondiente a la proyección del frente del extensómetro sobre la cara de la fisura. En la [Figura 6a](#) se observa la forma de la boca de la fisura al finalizar el ensayo, en la [Figura 6b](#) se muestra la superficie de rotura con las marcas obtenidas por las tintas penetrantes.

| Beach Marks, Probeta 1 | | | | | |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ciclos | CH0 (mm) | CH1 (mm) | CH2 (mm) | CH3 (mm) | CH4 (mm) |
| 237263 | 0,857 | 2 | 2 | 1,714 | 0,857 |
| 357482 | 2,142 | 3 | 2,929 | 2,928 | 2,5 |
| 495389 | 3,714 | 4 | 4 | 4,1 | 3,9 |
| 644042 | 5 | 5,2 | 5,2 | 5,5 | 5 |

Tabla 1. Longitudes de fisura registradas a través de tintas penetrantes.



A



B

Figura 6. A) Forma presentada por la boca de la fisura al finalizar el ensayo, B) Superficie de rotura de la misma probeta, se observan las marcas obtenidas por tintas penetrantes.

Las longitudes de fisura "a" calculadas a partir de cada canal de deformación fueron inicialmente obtenidas para H=1. Estos valores deben ser corregidos para cada canal en función del valor de H correspondiente, en la [Tabla 2](#) se listan los valores de H obtenidos.

| Canal | CH0 | CH1 | CH2 | CH3 | CH4 |
|-------|------|------|-----|-----|------|
| H(mm) | 2,93 | 2,66 | 2,6 | 2,6 | 2,33 |

Tabla 2. Valores de H obtenidos para cada extensómetro.

En función de las longitudes de fisura medidas, del valor de H medido para cada canal de deformación, la pendiente P0 registrada al inicio del ensayo y de las sucesivas pendientes P obtenidas se obtuvo una curva de calibración, [Figura 7](#), válida para fisuras de hasta 2 mm.

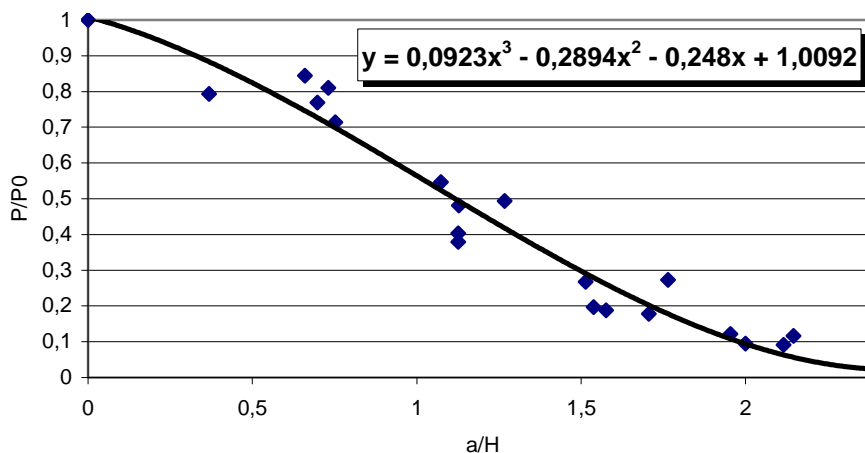


Figura 7. Curva de calibración obtenida a partir de los puntos experimentales. Allí se observan los puntos experimentales y una curva de ajuste aproximada por la expresión indicada. Los resultados obtenidos muestran similar comportamiento que los presentados en publicaciones previas ([Chapetti 1995, a](#)).

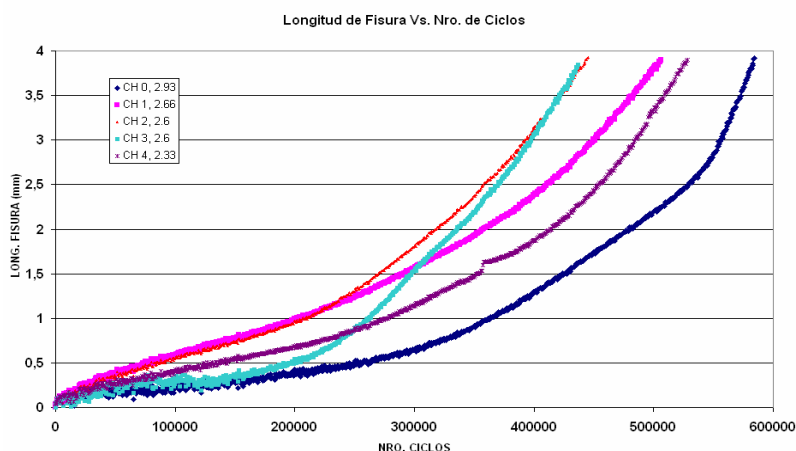


Figura 8. Curva experimentales obtenidas, se muestran las longitudes de fisura obtenidas para cada canal de extensometría en función del número de ciclos.

4 CONCLUSIONES

Los resultados parciales obtenidos de la aplicación de FEM al análisis de la vida a fatiga para una geometría determinada del cordón de soldadura haciendo uso de la metodología fractomecánica han arrojado resultados consistentes con los obtenidos previamente por otros autores,

Se hace necesario el desarrollo de análisis paramétricos a través de FEM de las distintas variables intervinientes en una unión soldada con el objeto de cuantificar su incidencia en su vida a fatiga.

Se logró implementar una metodología experimental de ensayo capaz de monitorear la iniciación y propagación de fisuras iniciadas en talones de soldadura. Para la práctica experimental se aplicó en forma exitosa el método de extensometría eléctrica apoyado en un sistema de adquisición y procesamiento de datos.

Dado que el sistema experimental de monitoreo de fisuras está basado en la utilización de extensómetros, se observa que la calidad en el registro del avance de la fisura puede ser mejorada a través de la utilización de mayor cantidad de unidades, cantidad que solo estaría limitada por las características físicas de los extensómetros utilizados, la geometría de la probeta y la cantidad de canales de medición disponibles.

La técnica experimental presenta una flexibilidad elevada dado que puede ser aplicada en distintas configuraciones de uniones soldadas. En cualquiera de los casos deberá registrarse la carga y la deformación cercana a la zona de la fisura.

Los resultados preliminares, tanto numéricos como experimentales, muestran que las metodologías a utilizar permitirán avanzar en el estudio y la cuantificación de la influencia de las variables más importantes que intervienen en la definición del comportamiento a fatiga de uniones soldadas.

5 REFERENCIAS

- Anderson T.L.: Fracture Mechanics, 2nd edn., CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida, 1995.
- Chapetti M.D., Belmonte J., Tagawa T. and Miyata T.: "Integrated fracture mechanics approach to analyse fatigue behaviour of welded joints", Science and Technology of Welding and Joining, Vol.9, Nro. 5, 2004.
- Chapetti M.D.: Propagación subcrítica de fisuras en aceros estructurales soldados, Tesis Doctoral, 1995.
- Chapetti M.D., Otegui J.L.: A Technique to produce automatic welds with enhanced fatigue crack propagation lives under transverse loading, International Journal Of pressure Vessel & Pipping, No. 70, pp 173 – 181, c, 1997.
- Chapetti M.D., Otegui J.L.: Controlled toe waviness as a means to increase fatigue resistance of automatic welds in transverse loading, International Journal Of Fatigue, Vol. 19, No. 10, pp 667 – 675, b, 1997.
- Chapetti M.D., Otegui J.L.: Importance of toe irregularity for fatigue resistance of automatic welds, International Journal Of Fatigue, Vol. 17, No. 8, pp 531 – 538, a, 1995.
- Gurney T.A.: Fatigue Of Welded Structures, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 1978.
- Jaureguizar L., A.Martinez del Pezzo, Chapetti M.D.: Estimación de la resistencia a fatiga de uniones soldadas. SAM – Conamet, 2007.
- Martinez del Pezzo, Jaureguizar L., Chapetti M.D.: Estimación de la influencia de variables geométricas en la resistencia a la fatiga de uniones soldadas a tope. TANAMAT, 2007.

- Miller K.J. and De los Rios E.R.: "The behaviour of short fatigue cracks", EGF publication, London, 1988.
- Maddox S.J.: International Journal Of Fatigue, 2, 221 – 243, 1975.
- Martinez del Pezzo A.: "Análisis de la influencia de parámetros geométricos en el comportamiento a fatiga de uniones soldadas utilizando nuevas metodologías", Tesis de Maestría, 2008.
- Suresh S. and Ritchie R.O.: Int. Met. Rev., 29, 445-475, 1984.
- Wessel C., Cisilino A., Santi O., Otegui J., Chapetti M.: Numerical and experimental determination of three-dimensional multiple crack growth in fatigue. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, No. 35, pp 47 – 58, 2001.