

Estudio comparativo de la influencia de taladrado de agujeros y técnicas de indentación sobre el crecimiento de grietas por fatiga

L. M. Cárdenas⁽¹⁾, M. Martínez⁽¹⁾, J. Chitty⁽²⁾, A. Pertuz⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica,
Apartado postal, 48222, Los Chaguaramos, Caracas 1041-A.

⁽²⁾ Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Dpto. de matemáticas aplicas,
Apartado postal, 48222, Los Chaguaramos, Caracas 1041-A.

Email: alberto.perluz@rect.ucv.ve

Resumen

El presente trabajo compara el efecto de las técnicas de retardo de crecimiento de grieta por fatiga usando las técnicas de taladrado de agujero y deformación plástica por compresión en la punta de la grieta, sobre el comportamiento en el crecimiento de grietas por fatiga. Se determinan las gráficas de longitud de grieta, 'c', en función del número de ciclos, 'N', en probetas entalladas de Aluminio 3003 normalizado en ensayos de fatiga por flexión alternativa. Los resultados obtenidos se compararon con los reportados por tres probetas sin ninguna técnica aplicada, mostrando que el taladrado mejora la vida a la fatiga en un 15%, mientras que por indentación lo mejora en tan solo un 4,2%. La mayor proporción en la mejora alcanzada por la técnica de taladrado es consecuencia de la nucleación de una nueva grieta de fatiga lo cual toma un número apreciable de ciclos. Por otro lado, la mejora alcanzada por la técnica de indentación es consecuencia de la zona plástica que debe atravesar la grieta con los correspondientes esfuerzos residuales de compresión que retardan así la propagación de la grieta. Adicionalmente, se calculó la velocidad de propagación de grietas en función de la amplitud del factor de intensidad de esfuerzo y se obtuvieron los valores 'c' y 'm' de la ecuación de Paris para este aluminio, comprobando la validez de esta relación.

Palabras clave: Fatiga, técnicas de retraso de crecimiento de grietas, taladrado, indentación.

Comparative study of influence the drilling procedure and indentation technique on fatigue crack growth

Abstract

The present work compares two fatigue crack retardation in this sense the drilling procedure and the plastic deformation by indentation technique were used. Curves of longitude crack "c" versus cycles number "N", are determined in samples of aluminum 3003 normalized on fatigue test by alternative flexion. The results were compared with three tests without any applied technique. The results show that the drilling procedure improves the fatigue life in 15%, whereas by indentation technique improves in only 4.2%. The biggest proportion improvement reached for drilling procedure is consequence of new crack nucleation of fatigue which takes an appreciable cycles number. On the other hand, the improvement reached by the indentation technique is consequence of the plastic zone with the corresponding compression residual stress that should cross the crack and slow down therefore the propagation of the crack. Additionally, the Paris equation parameters were obtained, verifying the validity of this relationship.

Keywords: Fatigue, retardation technical of crack growth, drilling technical, indentation.

1. INTRODUCCIÓN

Para lograr el control de la fractura por fatiga de un componente, retardar o frenar una grieta que se

propaga es técnicamente imprescindible si se quiere que el componente agrietado continúe en servicio. La confiabilidad operacional de elementos agrietados requiere la detección y reparación de grietas así como

una evaluación de vida remanente.

En caso de que se presente una grieta en una pieza sometida a esfuerzos fluctuantes, una de las acciones que se puede tomar es retardar o detener la propagación de la grieta para que el componente continúe en servicio y se pueda controlar la fractura. Con esta finalidad se han desarrollado diferentes métodos de reparación o frenado de grietas por fatiga para alargar la vida útil del componente [1]. Entre estos métodos se encuentran la soldadura de reparación de grietas, el granallado con perdigones, la introducción de ciclos de sobrecarga del elemento solicitado, la inserción de materiales epóxicos en la falla, el perforado de agujeros en la punta de la grieta y la realización de indentaciones en la punta de la grieta.

El procedimiento de taladrado consiste en hacer un pequeño orificio circular en la punta de la grieta para reducir la severidad de la concentración de esfuerzos y cambiar la curvatura asociada a la afilada punta de la grieta a una curvatura mucho más suave correspondiente al radio del agujero [2, 3].

La técnica de retraso de crecimiento de grieta conocida como indentación consiste en presionar una esfera de acero en la punta de la grieta o en su trayectoria esperada. De esta forma se generan esfuerzos residuales de compresión en la punta y alrededor de la punta de la grieta, lo cual a su vez reduce la tasa de propagación de la misma [4].

A pesar de que se han investigado diferentes formas de aplicación de las prácticas antes mencionadas se ha estudiado poco la comparación directa entre ellas para saber cual es más favorable para la vida a la fatiga. Con base en esto, el presente trabajo se centró en el estudio comparativo del crecimiento de grieta por fatiga frente al taladrado de agujeros en la punta de la grieta y a la aplicación de indentación, para así determinar de manera clara cual procedimiento es más beneficioso para la vida a la fatiga del Aluminio 3003 solicitado a flexión alternativa.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para la elaboración de las probetas se utilizó un aluminio 3003, el cual contiene los elementos de aleación [5] mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química Al. 3003.

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Zn
Porcentaje	0.6	0.7	0.05-0.20	1.0-1.5	0.1

Se realizaron los ensayos de tracción para este material según la norma ASTM B557M. Las probetas de fatiga se diseñaron y maquinaron con base a las indicaciones sugeridas por el manual de la máquina para ensayos de fatiga marca Fatigue Dynamics LFE-150[6]. Posteriormente las probetas fueron entalladas mediante el fresado de una cara lateral, empleando una fresa para entallas de ensayo charpy tipo V; esto con la finalidad de introducir un concentrador de esfuerzos a partir del cual crezca la grieta de fatiga (ver figura 1).

Las probetas fueron pulidas superficialmente hasta llegar al papel abrasivo N° 2000. El ensayo de fatiga a flexión alternativa se llevó a cabo con una deflexión máxima de 3,2 mm, para esta deflexión, la deformación era totalmente elástica y correspondió a un esfuerzo de aproximadamente el 80% del esfuerzo de fluencia del material. Se trabajó con una relación de esfuerzo 'R=0'. La medición del tamaño de grieta se realizó mediante la observación directa de la longitud de la grieta en la cara superior de la probeta pulida. Se utilizó un aumento de 5X y papel milimetrado. El papel milimetrado se ubicó de forma tal que coincidiera con el eje de la entalla. Se almacenó la información obtenida: longitud de grieta en milímetros y número de ciclos en función de la longitud de grieta.

Se ensayaron tres probetas base y se permitió el crecimiento de grieta hasta una longitud de 26 mm. Luego se tomaron otras tres probetas que se ensayaron en las mismas condiciones y cuando la grieta tuvo una longitud de 10 mm desde la punta de la entalla se taladró un agujero pasante de 3mm de diámetro a una distancia de 2 mm de la punta visible de la grieta en la superficie superior de las tres probetas.

Inmediatamente después de la operación de taladrado del agujero se re-ensayaron las probetas bajo las condiciones originales de carga, hasta que la longitud de la grieta de cada una alcanzó aproximadamente 26 mm. Finalmente se ensayaron tres probetas a fatiga hasta que la longitud de la grieta alcanzó

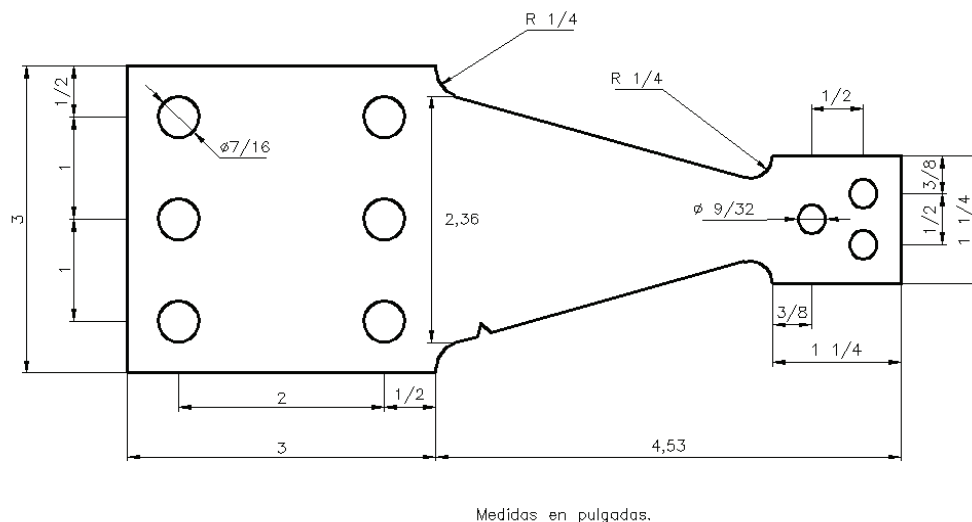


Figura 1. Diseño de las probetas

aproximadamente 26 mm. Finalmente se ensayaron tres probetas a fatiga hasta que la longitud de la grieta alcanzó aproximadamente los 10 mm. Luego se realizó una indentación a 2 mm de la punta visible de la grieta en la superficie superior de las tres probetas. Esta indentación fue realizada con un penetrador Brinell usado para ensayos de dureza, el cual tiene 5mm de diámetro, la carga utilizada fue de 250 Kg. Las probetas se re-ensayaron a fatiga hasta que la longitud de la grieta alcanzó 26mm aproximadamente.

Una vez obtenidos los tamaños de grieta en función del número de ciclos, se determinó el factor de intensidad de esfuerzo, según la siguiente relación [7]:

3. RESULTADOS Y SU ANALISIS

Durante el desarrollo de la parte experimental se determinaron la longitud de la grieta 'c' para los respectivos valores de ciclos acumulados 'N'. Las representaciones gráficas superpuestas se muestran en la figura 2. El número de ciclos para iniciar una grieta de fatiga de 0,5 mm desde el agujero taladrado es tomado como el punto de reinicio o nucleación de la grieta y por tanto este punto es usado para cuantificar la ganancia de vida a fatiga ' N_i ' en las probetas taladradas respecto de aquellas sin taladrar (probetas base) y respecto a las indentadas.

$$Y = 1.12 - 0.231\left(\frac{c}{b}\right) + 10.55\left(\frac{c}{b}\right)^2 - 21.72\left(\frac{c}{b}\right)^3 + 30.39\left(\frac{c}{b}\right)^4 \quad (1)$$

con, $\frac{c}{b} < 0,6$ donde: c = tamaño de grieta; b = ancho de probeta.

Posteriormente, se calculó la velocidad de propagación de grieta usando el Método de la Secante, sustentado por la norma ASTM 647. De las gráficas obtenidas se determinaron los valores de los coeficientes 'c' y 'm' de la ecuación de Paris, así como el factor de correlación 'R²'.

Para el caso de la indentación se toma el valor de 0,5 mm de longitud de grieta, luego de la huella dejada por el indentador, como el valor de reinicio de grieta ' N_i ' para poderlo comparar con el valor correspondiente en el proceso de taladrado y con las probetas base. Cabe mencionar que en el proceso de indentación no existe reinicio o nucleación de grieta.

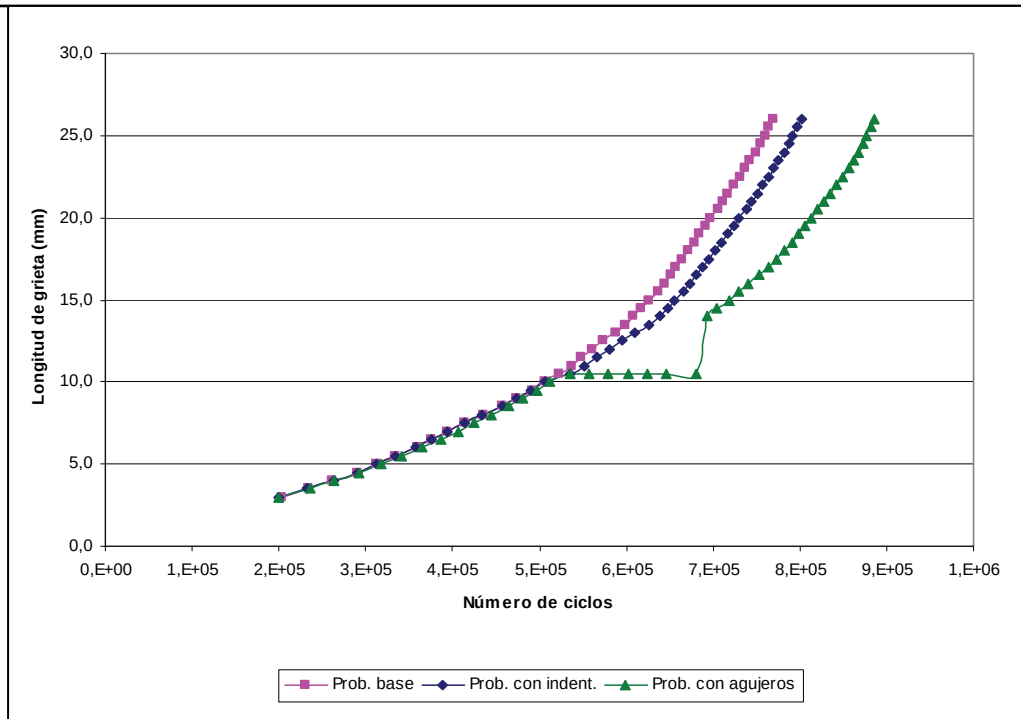


Figura 2. Longitud de grieta 'c' vs. 'N' Número de ciclos.

Cuando los agujeros del proceso de taladrado aumentan su diámetro, estamos eliminando la zona deformada plásticamente, pero también estamos aumentando la concentración de esfuerzo. Amrouche et al [8], encontraron que existe un tamaño de diámetro de taladrado y un tamaño de expansión esférica de saturación, luego de los cuales no tiene sentido aplicar la técnica.

De los resultados obtenidos en la Figura 2 se obtuvo la Tabla 2. Al comparar las tres tendencias en la Figura 2, se aprecia el retraso del crecimiento de grieta en las probetas con aplicación de la indentación y el taladrado con respecto a las probetas base.

El retraso presentado por las muestras indentadas es consecuencia del aumento de la zona plástica en la punta de la grieta creada por la introducción de esfuerzos residuales de compresión en el frente de grieta al hacer la indentación. En la medida que la carga de indentación se aumenta, podríamos tener mayor zona afectada por la deformación plástica y como consecuencia una mayor retardo en el crecimiento de grieta, esto retarda el subsiguiente crecimiento de grieta cuando esta pasa a través de esta zona de esfuerzo residual de compresión. Se tiene de la Tabla 2, que el número de ciclos que tarda la grieta en tener 0,5 mm de longitud desde la huella de la inden-

Tabla 2. Reinicio de grieta y vida total a fatiga en las probetas.
(*) $([N_T - N_{T \text{ Base}}] / N_{T \text{ Base}})$

Probetas	Re-Inicio de grieta por fatiga 'N _i ' (ciclos)	Vida total a fatiga 'N _T ' (ciclos)	Mejora vida a fatiga (%) ^(*)
Base	-	769.601	-
Indentación	11.256	801.632	4,2
Taladrado	159.159	885.663	15,0

indentación ("re-inicio" de grieta por fatiga ' N_i ') es de 11.256 y además se tiene una mejora de 4,2 % en la vida a la fatiga respecto de las probetas base.

El retraso en el crecimiento de grieta mostrado por las probetas con agujeros taladrados es debido a que se disminuyó la concentración de esfuerzos en la punta de la grieta al aumentar el radio de curvatura en la punta de la grieta y además se remueve totalmente la zona al frente de la misma. Esto da lugar a que la grieta debe volver a generarse a través del proceso de nucleación que toma un tiempo considerable de la vida a la fatiga (que puede ser tan largo como el 70% o incluso 80% de la vida del componente [8] y se toma una cantidad de 159.159 ciclos hasta que se puede apreciar una grieta de 0,5 mm desde el agujero taladrado (ver tabla 2). De esta forma se tiene un desplazamiento apreciable de la gráfica en relación con las probetas base por la presencia del número de ciclos ' N_i ' que tarda en nuclear la grieta. Dicha nucleación de la grieta desde el agujero taladrado produce una mejora de la vida a fatiga de 15 % respecto de las probetas base.

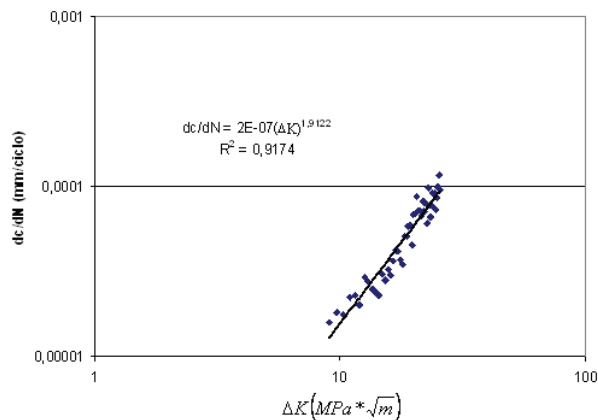


Figura 3. Velocidad de crecimiento de grieta vs. Factor de intensidad de esfuerzo.
"Probetas Base"

Para estos procesos de crecimiento de grietas con o sin retraso se fijó como vida a la fatiga, la cantidad de ciclos que se toma la grieta en alcanzar una longitud de 26 mm.

En las Figuras 3, 4 y 5; se presentan las gráficas de velocidad de crecimiento de grieta ' dc/dN ' contra la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos, ' DK ', para las probetas de aluminio 3003 normalizado,

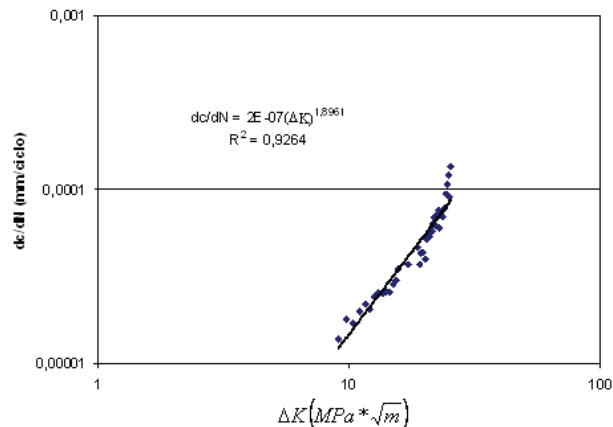


Figura 4. Velocidad de crecimiento de grieta vs. Factor de intensidad de esfuerzo.

"Probetas con agujeros"

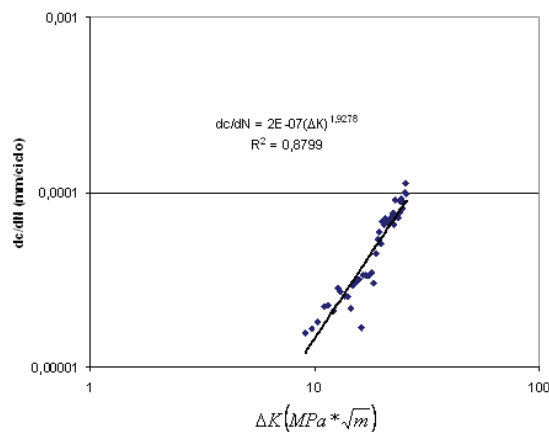


Figura 5. Velocidad de crecimiento de grieta vs. Factor de intensidad de esfuerzo.

"Probetas con indentación"

sometidas a los ensayos de fatiga. A partir de estas curvas y conociendo el esfuerzo al cual está sometido el material, es posible determinar el factor de intensidad de esfuerzos y los parámetros ' c ' y ' m ', con lo cual integrando la ecuación (2), se puede encontrar la longitud de la grieta por fatiga en función del número de ciclos a los cuales está sometido el material.

4. CONCLUSIONES

La técnica de perforado de agujeros aumenta el radio de curvatura en la punta de la grieta disminuyendo la concentración de esfuerzos en este punto. Además con el taladrado se remueve el material en el frente de la grieta, lo que causa que la grieta tenga

que nuclearse de nuevo para poder propagarse, retrasando así su crecimiento en el material e incrementando de forma apreciable la vida total a la fatiga.

La nucleación o inicio de la grieta puede tomar un tiempo considerable en la vida total a la fatiga de un componente.

La técnica de indentación genera un esfuerzo residual de compresión y una zona de deformación plástica en el frente de la grieta, lo cual causa un retraso en el crecimiento de la grieta a medida que avanza esta zona.

La ganancia en vida a la fatiga fue mayor usando taladrado que usando indentación para las condiciones de carga, forma de aplicación de esfuerzo y geometría de probetas utilizadas en el presente trabajo.

Se comprueba que los parámetros ' c ' y ' m ' de la ecuación de Paris dependen del material ensayado a fatiga y no varían apreciablemente con la aplicación de técnicas de retraso de crecimiento de grietas.

5. AGRADECIMIENTOS

La presente investigación ha sido llevada a cabo con el soporte financiero del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela, (CDCH-UCV) Proyectos PG 08-00-5673-2004 y PI 08-00-5668-2004. Igualmente, queremos agradecer al CITALA, por habernos permitido ensayar las muestras de fatiga en sus instalaciones.

6. REFERENCIAS

- [1] Domazet Z. 1996 . "Comparison of Fatigue Crack Retardation Methods". Engineering Failure Analysis. Vol. 3 . pp. 137-147.
- [2] Hertzberg R. W. 1978. "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials "Mc Graw Hill".
- [3] Song P.S., Shieh Y.L. "Stop drilling procedure for fatigue life improvement". International Journal of Fatigue. Vol 26. 2004. pp.1333-1339.
- [4] Song P. S., Sheu. G. L. "Retardation of fatigue

crack propagation by indentation technique" International Journal of Pressure Vessels and Piping 79. 2002. pp. 725-733.

- [5] ASM Handbook. Vol. 2 "Properties and Selection: Non Ferrous Alloys and Special Purpose Materials". p.18.
- [6] Instruction Manual. Model LFE-300. "Variable Speed Life, Fatigue, and Endurance Testing Machine".
- [7] Klesnil M. and Lukás. P. 1980. "Fatigue of Metallic Materials" Materials Science Monographs, 7.
- [8] Amrouche A., Mesmacque G., S. García, A. Talha. "Cold expansion effect on the initiation and the propagation of the fatigue crack". International Journal of Fatigue. Vol. 25. 2003. pp. 949-954.
- [9] Suresh S. 1991. "Fatigue of Materials". Cambridge: Cambridge University Press.
- [10] ASM Handbook. Vol. 2 "Properties and Selection: Non Ferrous Alloys and Special Purpose Materials". p.18.