COMPORTAMIENTO EN FATIGA DE ACEROS ESTRUCTURALES PUNZONADOS

L. Sánchez, D. Pesquera y F. Gutiérrez-Solana

Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Universidad de Cantabria
E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos. Avda. Los Castros s/n, 39005-Santander

Resumen. En el marco de un proyecto de investigación sobre los criterios de comportamiento de aceros estructurales conformados en frío se está llevando a cabo el estudio del comportamiento en fatiga, a través de la determinación de las curvas de Wöhler, $\Delta\sigma$-N, de chapas de acero de distintas calidades y 15 mm espesor con agujeros de 15 mm de diámetro realizados mediante punzonado y también mediante taladrado. Con el objeto de definir las causas de la iniciación del proceso de fisuración se ha realizado un estudio del efecto del punzonado sobre las propiedades locales del material a partir de las curvas de isodureza en el entorno del agujero. Asimismo se ha llevado a cabo un exhaustivo análisis de las superficies de fractura para determinar las zonas de iniciación de la fisura.

Abstract. In the framework of a research project on the performance criteria for cold formed structural steels, a study of fatigue behaviour is being developed by means of the determination of the Wöhler curves ($\Delta\sigma$-N) in 15 mm width steel plates with different qualities and 15 mm diameter holes, made by punching and drilling. In order to define the crack initiation causes, we have studied the effect of the punching on the local properties of the material using the isohardness curves around the hole. Moreover, an exhaustive analysis of the fracture surface has been performed, in order to determine the point of crack initiation.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Ante el progresivo aumento de la calidad de los aceros y la mejora de los procesos a que son sometidos éstos, algunos post-procesos que habían perdido vigencia vuelven a ponerse de actualidad gracias a su interés económico. Este interés se fundamenta en la mayor rapidez, limpieza, versatilidad y rentabilidad económica de estos post-procesos, en particular del punzonado, en comparación con otros actualmente en uso.

Las primeras investigaciones sobre los fundamentos teóricos del punzonado comenzaron en Europa central en los años treinta, extendiéndose posteriormente por Japón y USA. Actualmente, el punzonado es un proceso ampliamente conocido sobre chapa fina, debido a su aplicación en el campo de la automoción; sin embargo, el nivel de conocimiento sobre este proceso en los aceros estructurales es bajo y su uso está fuertemente restringido por códigos y normas [1].

El punzonado modifica las características mecánicas en torno al agujero generado, lo que resulta fundamentalmente crítico para la vida en fatiga de las uniones hechas con este sistema, ya que el material sufre una fragilización y una fisuración local que se pueden transformar en el inicio de un proceso de propagación por fatiga.

El objetivo de este trabajo es caracterizar el efecto del punzonado sobre la microestructura y la dureza de aceros estructurales, así como determinar el comportamiento en fatiga de chapas punzonadas en comparación con las taladradas.

2. MATERIAL Y PROCESO DE PUNZONADO

Los materiales estudiados son tres aceros estructurales laminados de especificación 355N, 460Q y 690Q, el primero normalizado y los otros dos templados y revenidos. En las Tablas 1 y 2 se muestran, respectivamente, las composiciónes químicas de los tres aceros y las propiedades mecánicas [2].

Se llevó a cabo la caracterización microestructural de los tres aceros mediante técnicas de microscopía óptica y electrónica de barrido. En la Fig. 1 se muestra un esquema de una chapa en la cual se define la notación para identificar cada uno de las planos de la misma. En la micrografía óptica de la Fig. 2 se observa la estructura bandeada ferrítico-perlítica del acero 355N en el plano TS que es similar a la del LS y en la Fig. 3 se muestra una micrografía electrónica del plano LT en el que se aprecian las láminas de ferrita y cementita en la perlita, no observándose la estructura bandeada de los otros dos planos. En las micrografías electrónicas de las Fig. 4 y 5 muestran, respectivamente, la microestructura bainítica de los aceros 460Q y 690Q en el plano TS, si bien cabe señalar que estos dos aceros presentan aspectos microestucturales semejantes en los tres planos.

Tabla 1. Composición química de los aceros.

	355N	460Q	690Q
C	0.17	0.08	0.156
Si	0.3	0.3	0.256
Mn	1.35	1.31	1.31
P	0.02	0.014	0.016
S	0.011	0.003	0.001
Al	0.034	0.037	0.03
Cr	0.02		0.052
Mo	0.01	0.17	0.21
Ni	0.02	0.51	0.035
Cu	0.02		0.025
Nb	0.01		0.001
N	0.005		
Ti	0.02		
V	0.035	0.05	0.03

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los aceros.

	Microestructura	HV	σ_y(MPa)	σ_u(MPa)
355N	Ferrita-perlita	209	423	602
460Q	Bainita	251	619	685
690Q	Bainita	305	853	866

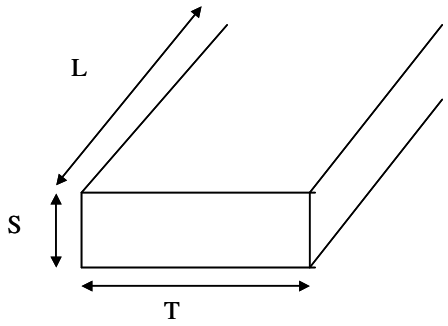


Fig. 1. Definición de las orientaciones en la chapa.

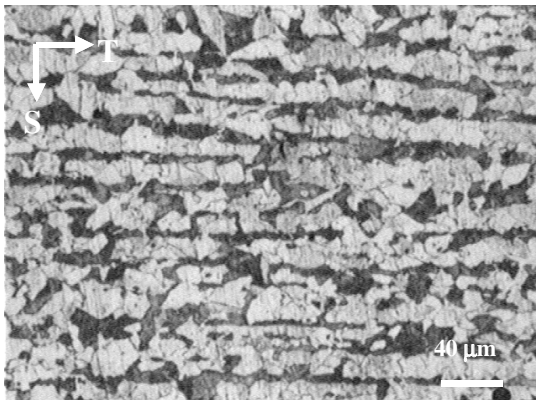


Fig. 2. Micrografía óptica del acero 355N.

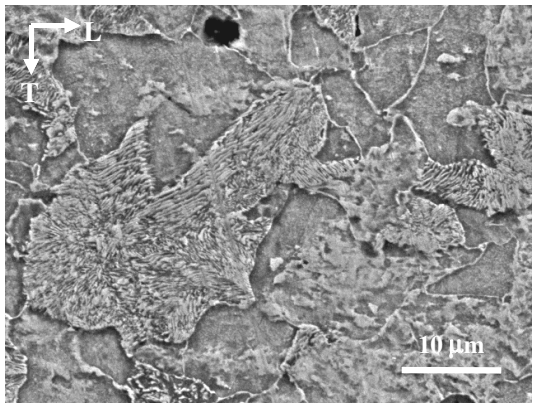


Fig. 3. Micrografía electrónica del acero 355N.

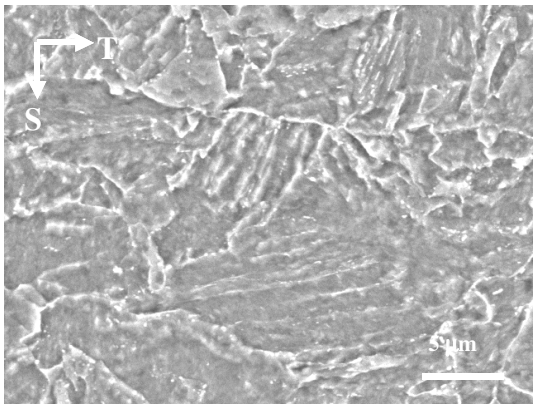


Fig. 4. Micrografía electrónica del acero 460Q.

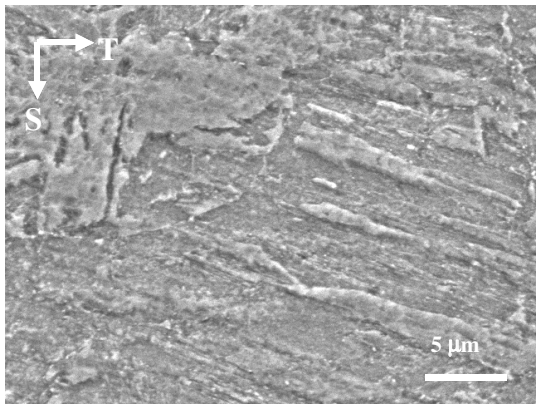


Fig. 5. Micrografía electrónica del acero 690Q.

El proceso de punzonado consiste en un punzón que penetra en el material, soportado por una matriz, sobre el que origina un orificio. El parámetro característico de este proceso es la holgura, que representa la diferencia entre los diámetros del punzón y de la matriz. El proceso de punzonado se llevó a cabo sobre chapas de 15 mm de espesor utilizando un punzón de 15 mm de diámetro con una matriz de 16.7 mm de diámetro. En la Fig. 6 se muestra una macrografía del corte de la chapa de acero 355N después del punzonado de la misma y en la micrografía de la Fig. 7 se observa como las bandas de ferrita y perlita, en las proximidades del agujero, se encuentran giradas prácticamente 90º, disponiéndose de modo casi paralelo al borde del agujero.



Fig. 6. Macrografía de la superficie del agujero.

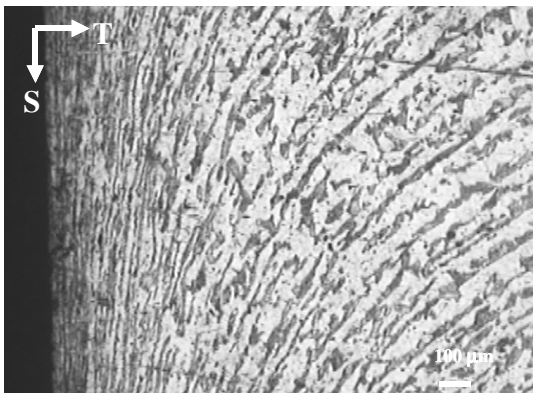


Fig. 7. Bandas de ferrita y perlita deformadas.

3. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

3.1. Caracterización de la zona dañada por el proceso de punzonado

Para caracterizar el efecto del punzonado se llevaron a cabo ensayos de microdureza, aplicando una carga de 100 g durante 20 s, sobre las zonas afectadas. Estos ensayos han permitido observar la variación de la dureza tanto a lo largo del agujero como en la dirección perpendicular al mismo (Fig. 6). En la Fig. 8 se presenta un ejemplo característico de la evolución de la dureza en el borde del agujero.

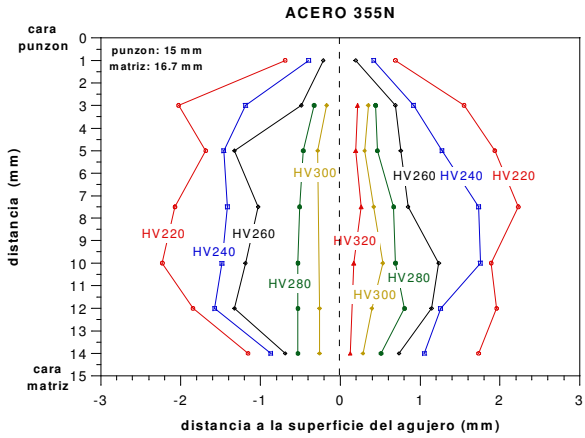


Fig. 8. Evolución de la dureza en el borde de un agujero punzonado (espesor 15mm y diámetro 15mm).

La dureza del material no afectado en el plano TS es de 211 Vickers, mientras que la dureza en la zona próxima al borde, en el centro del agujero ha experimentado un aumento aproximado del 50%, alcanzando un valor de 320 Vickers. Este incremento se ha observado en todas las probetas ensayadas, independientemente del tipo de acero, espesor u holgura empleadas en el proceso de punzonado.

A partir del estudio micrográfico se pueden establecer tres zonas diferentes alrededor de la superficie del agujero (Fig. 9):

Zona 1: corte por contacto con el punzón
Zona 2: desgarro del material, mayor zona dañada y mayor plastificación
Zona 3: corte por contacto con la matriz.

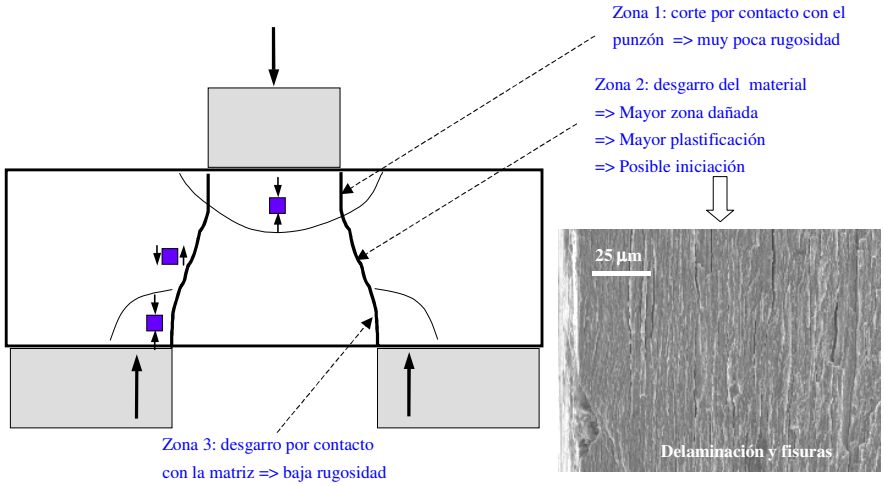


Fig. 9. Diagrama esquemático de las tres zonas identificadas alrededor del agujero después del punzonado y micrografía SEM en la zona 2 en la que se aprecian fisuras.

3.2. Determinación de la Ley de Paris

Para la obtención de la Ley de Paris del material, se realizaron ensayos de fatiga a flexión en tres puntos sobre probetas normalizadas tipo SENB, de 12.5 mm de espesor, siguiendo la norma ASTM E 399 [3]. En la Fig. 10 se muestra un esquema del dispositivo de ensayo.

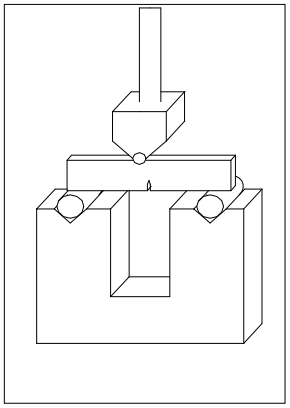


Fig. 10. Utillaje para los ensayos de fatiga a flexión.

El proceso seguido consiste en aplicar una carga variable, de amplitud constante, durante un número determinado de ciclos, midiendo posteriormente la longitud de la fisura. En cada paso se obtiene, por tanto, una velocidad de crecimiento para un determinado valor del factor de intensidad de tensiones.

Las leyes de Paris obtenidas para los aceros 355N, 460Q y 690Q se muestran en las Fig. 11, 12 y 13, respectivamente, observándose una gran similitud entre todas ellas.

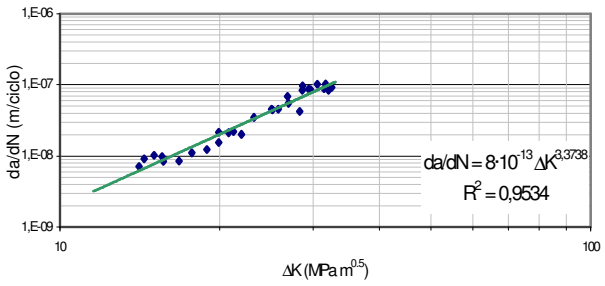


Fig 11. Ley de Paris del acero 355N.

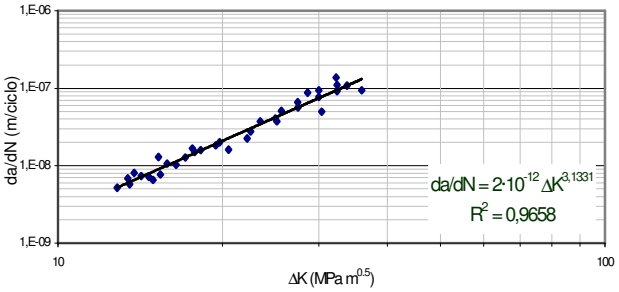


Fig 12. Ley de Paris del acero 460Q.

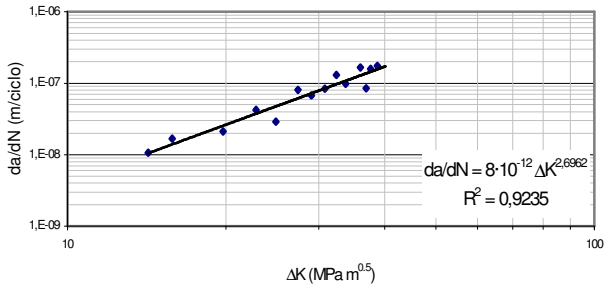


Fig. 13. Ley de Paris del acero 690Q.

3.3. Obtención de las Curvas de Wöhler para aceros punzonados y taladrados

Para determinar las curvas de Wöhler de los diferentes aceros se han llevado a cabo ensayos de fatiga a tracción sobre probetas punzonadas y taladradas cuya geometría se muestra en la Fig. 14. Los valores seleccionados para la tensión máxima en la sección neta fueron un porcentaje, comprendido entre el 10 y el 90%, del límite elástico. Estos ensayos se realizaron con una máquina universal INSTRON 8500 a una frecuencia de 15 Hz. También se realizaron ensayos sobre probetas punzonadas con un tratamiento posterior de shoot-peening con el fin de comparar su comportamiento con el de las anteriores.

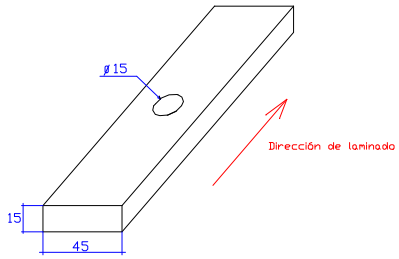


Fig. 14. Geometría de las probetas de los ensayos de fatiga.

En las Fig. 15, 16 y 17 se muestran todos los resultados obtenidos para los aceros 355N, 460Q y 690Q, respectivamente.

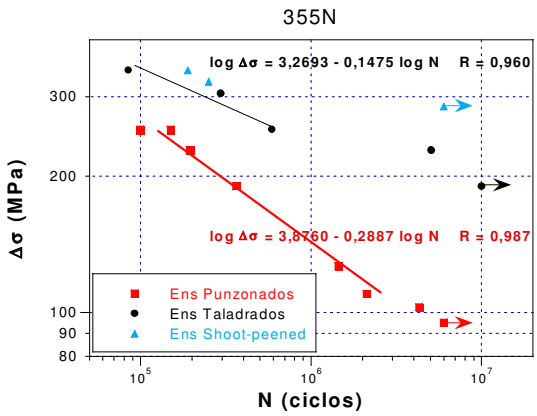


Fig 15. Resultados de los ensayos de fatiga sobre el acero 355N.

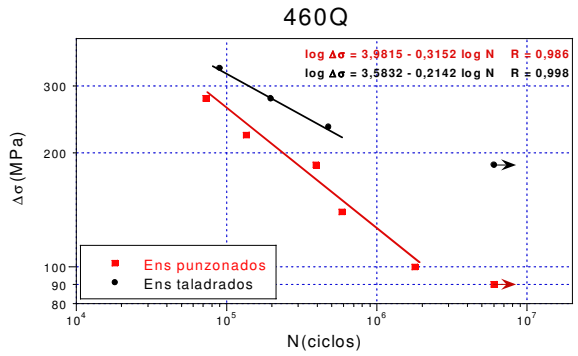


Fig. 16. Resultados de los ensayos de fatiga sobre el acero 460Q.

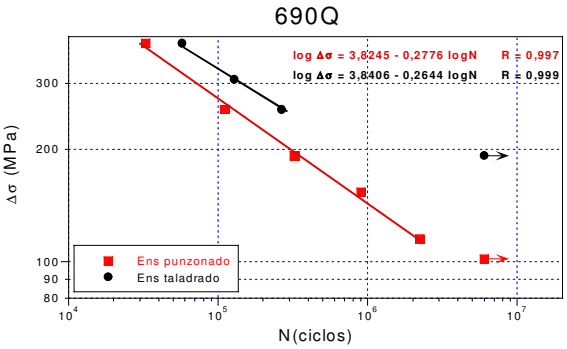


Fig. 17. Resultados de los ensayos de fatiga sobre el acero 690Q.

En la Tabla 3 se muestran los umbrales de propagación de los tres aceros en las distintas condiciones ensayadas y la relación entre el de punzonada y el de taladrado.

Tabla 3. Umbrales de propagación.

	$\Delta\sigma_{th}$ (MPa) Punzonado	$\Delta\sigma_{th}$ (MPa) Taladrado	$\Delta\sigma_{th}$(MPa) Shoot-peening	$\frac{\Delta\sigma_{th(pun)}}{\Delta\sigma_{th(tal)}}$
355N	95.2	190.4	285.5	0.50
460Q	90	185.7		0.48
690Q	102	191		0.53

La relación entre los umbrales es en los tres casos:

$$\Delta\sigma_{th} \text{ (taladrado)} \approx 2 \cdot \Delta\sigma_{th} \text{ (punzonado)}$$

Cabe destacar que los resultados de las probetas sobre las que se aplicó el shoot-peening, son superiores en todos casos al taladrado:

$$\Delta\sigma_{th} \text{ (shoot-peening)} \approx 1.5 \cdot \Delta\sigma_{th} \text{ (taladrado)}$$

Los ensayos realizados se equiparon con galgas extensométricas a ambos lados del agujero. En la Fig. 18 se muestra un ejemplo de la señal obtenida por una de esas galgas en una probeta del acero 355N punzonado.

Si se considera que la propagación de la fisura comienza en el punto en el que la galga sufre la primera variación, se puede obtener, el número de ciclos correspondientes tanto a la iniciación como a la propagación.

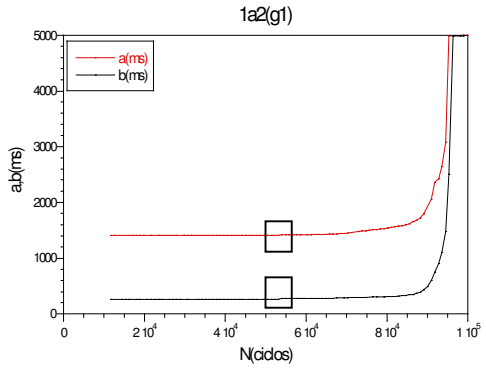


Fig. 18. Registro de una galga en una probeta del acero 355N punzonado (a y b: deformaciones máx y mín).

La representación de la relación entre los ciclos de iniciación y los ciclos totales se muestra en la Fig. 19. En esta figura se observa como en los ensayos punzonados la iniciación siempre representa un menor porcentaje que en los ensayos taladrados. En los aceros bainíticos punzonados 460Q y 690Q la iniciación supone un 30% de la vida de la probeta, mientras que en el acero ferrítico-perlítico 355N se alcanza el 58%. Por otro lado, dentro de los ensayos taladrados, en los aceros 355N y 460Q el porcentaje de iniciación alcanza el 85%, mientras que en el acero 690Q está por encima del 65%.

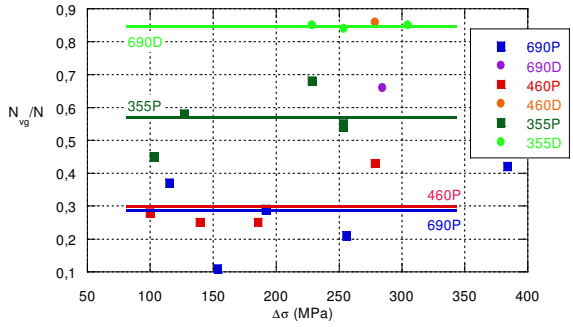


Fig. 19. Relación entre $N_{iniciación}$ y N_{total}.

3.4. Análisis fractográfico

El objetivo fundamental de este análisis es tanto la determinación del lugar de inicio de la fisura, como estudiar el desarrollo de la misma mediante técnicas de microscopía electrónica de barrido.

En la Fig. 20, que corresponde a una probeta del acero 355N, se muestra un ejemplo representativo de una probeta punzonada en la que se observa como la fisura se origina en la zona de transición entre las zonas de corte y de desgarro. Posteriormente, la fisura crece hacia la cara de entrada del punzón para una vez alcanzada la esquina, propagarse en forma de cuarto de circunferencia hasta la rotura.

En las probetas taladradas la determinación del lugar de inicio de la fisura no es tan sencilla, ya que se puede encontrar en cualquier punto a partir de los pequeños defectos generados por el propio proceso a lo largo del agujero.

Ejemplos de este tipo se muestran en las Fig. 21 y 22, correspondiendo la primera a una probeta del acero 355N y la segunda a otra del acero 690Q.

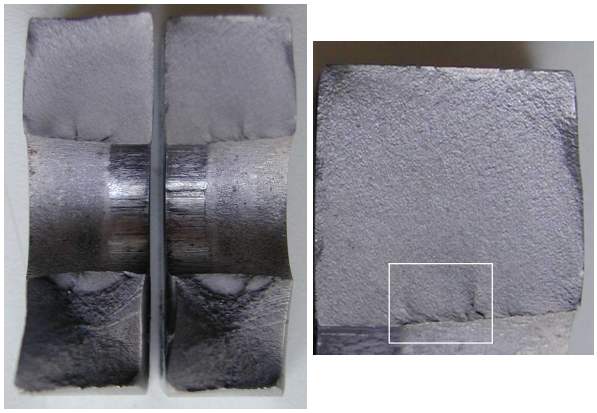


Fig. 20a. Macrografías de una probeta del acero 355N.

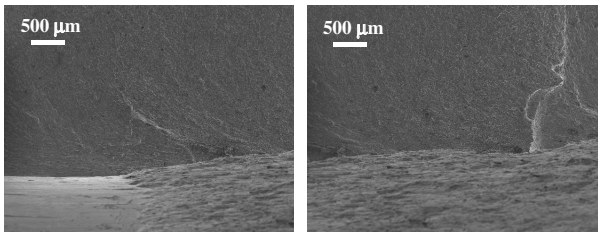


Fig. 20b. Micrografías de una probeta del acero 355N en la zona de inicio de la fisura.

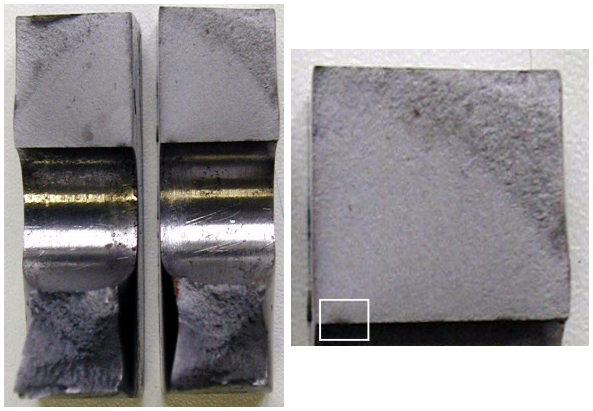


Fig. 21a. Macrografías de una probeta del acero 690Q.

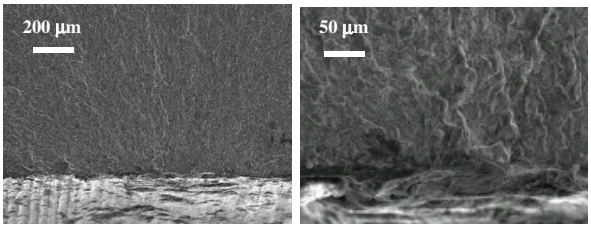


Fig. 21b. Micrografías de una probeta del acero 355N en la zona de inicio de la fisura.

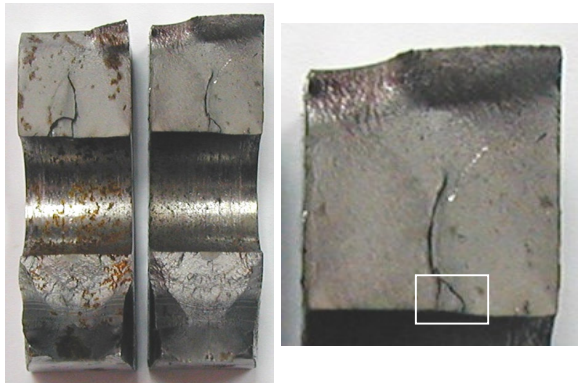


Fig. 22a**.** Macrografías de una probeta del acero 690Q.

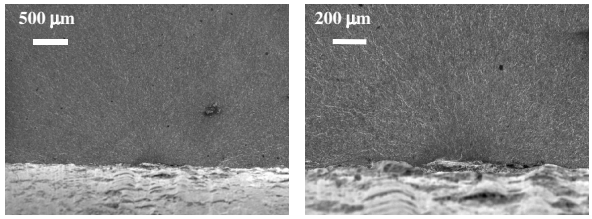


Fig. 22b. Micrografías de una probeta del acero 690Q.

4. CONCLUSIONES

Para los tres aceros estudiados, los umbrales de propagación son prácticamente iguales bajo el mismo proceso (punzonado o taladrado), siendo el umbral del acero taladrado el doble que el del punzonado.

Con el empleo del shoot-peening sobre las probetas punzonadas se consigue triplicar el umbral de propagación.

A partir del análisis de los registros de las galgas extensométricas se observa que, en las probetas punzonadas, los ciclos de iniciación en el acero ferrítico-perlítico, 355N, suponen casi un 60% de los ciclos totales, mientras que en los aceros bainíticos, 460Q y 690Q, son sólo el 30%. Por otro lado, en los aceros taladrados, en el 355N y el 460Q los ciclos de iniciación suponen un 85% de los ciclos totales mientras que en el acero 690Q el 65%.

El proceso de iniciación en las probetas punzonadas tiene lugar siempre en la zona de paso de la zona de corte a la zona de desgarro, mientras que en las probetas taladradas puede ocurrir en cualquier zona y está asociado a pequeños daños generados por el propio proceso de taladrado.

5.- REFERENCIAS

[1] 'Performance Criteria for Cold Formed Structural Steels'; ECSC Contract No. 7210.PR/246; London; March 2001.
[2] 'Performance Criteria for Cold Formed Structural Steels'; ECSC Contract No. 7210.PR/246; London; March 2002.
[3] 'Metals test methods and analytical procedures'; Annual Handbook of ASTM standards; vol 3.01; USA; 1997.

6.- AGRADECIMIENTOS

Este artículo se extrae del trabajo realizado hasta la fecha en el proyecto europeo "Performance Criteria for Cold Formed Structural Steels". ECSC No. 7210.PR/246.