

# EFFECTO DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO DE PUNZONADO SOBRE EL COMPORTAMIENTO EN FATIGA DE ACEROS ESTRUCTURALES

D. Pesquera, L. Sánchez 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 [1-2] se está llevando a cabo un estudio sobre la influencia de los diferentes parámetros del proceso de punzonado, como son la holgura, el diámetro del agujero, el espesor de la chapa y la dirección de aplicación de la carga, en el comportamiento en fatiga de aceros estructurales. Este estudio se realiza a través de la determinación de las curvas de Wöhler,  $\Delta\sigma$ -N, en cada uno de los casos anteriores. Por otra parte, para evitar los efectos perjudiciales del punzonado sobre la superficie del agujero, también se han realizado ensayos con probetas en las que el agujero se había realizado mediante taladrado y punzonado más shot-peening, obteniéndose resultados muy significativos. Asimismo, se ha llevado a cabo un exhaustivo análisis de las superficies de fractura de cada probeta, así como ensayos interrumpidos con el fin de determinar el lugar de iniciación de la fisura en cada caso y observar su posterior evolución.

**Abstract.** In the framework of a research project [1-2] on the performance criteria for cold formed structural steels, a study of the influence of different parameters of punching process on the fatigue behaviour, such as plate thickness, hole diameter, clearance and loading direction, is being carry out. This study is being performed by means of the determination of the Wöhler curves ( $\Delta\sigma$ -N) for each case. Also, drilling and punching + shot-peening processes have been used to avoid the damaging effects on the hole surface, and these results have been quite significant. Moreover, an exhaustive analysis of the fracture surface has been performed, as well as some interrupted tests, in order to determine the crack initiation point and the crack progress.

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

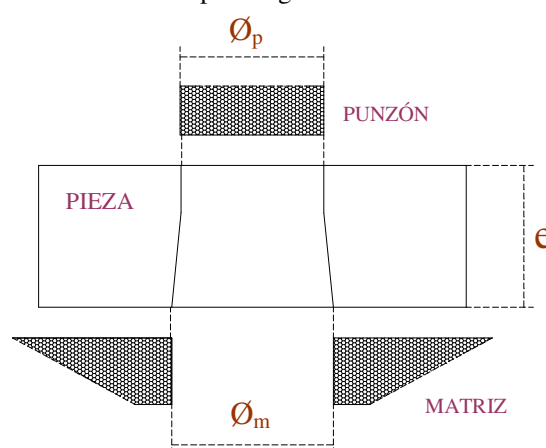
La evolución que se ha producido en los últimos tiempos tanto en los materiales empleados en ingeniería como en los métodos de conformado de los mismos ha provocado que procesos que habían perdido utilidad vuelvan a poder ser rentables. Uno de esos procesos es el punzonado, el cuál es utilizado para hacer agujeros en piezas destinadas a uniones atornilladas.

Hoy en día, 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 del punzonado sobre los aceros estructurales es bajo y su uso está fuertemente restringido por códigos y normas [3-4].

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 ( $\varnothing_p$ ) y de la matriz ( $\varnothing_m$ ) (Figura 1); además, la relación entre el diámetro del agujero y el espesor (e) es importante y no debe ser menor que la unidad en ningún caso para evitar la rotura del punzón.

El punzonado modifica las características mecánicas en torno al agujero generado [5], lo que resulta crítico para

la vida en fatiga de las uniones hechas con este sistema, ya que el material sufre un endurecimiento y una microfisuración local que puede provocar el inicio de un proceso de fisuración por fatiga.



$$\text{Holgura} = h = \varnothing_m - \varnothing_p$$

**Fig. 1.** Parámetros del proceso de punzonado.

El objetivo de este trabajo es caracterizar el efecto de los diferentes parámetros del proceso de punzonado sobre el comportamiento a fatiga de probetas punzonadas así como estudiar el proceso de fisuración que conduce a la rotura de las mismas. Finalmente, se

compararán los resultados obtenidos para el punzonado con los de otros dos procesos, empleados con la misma finalidad, como son el taladrado y el punzonado más shot-peening.

## 2. ANÁLISIS PREVIO DEL MATERIAL

El material empleado en este estudio ha sido, fundamentalmente, el acero 355N. Además, para el estudio comparativo del comportamiento a fatiga de materiales diferentes, se han empleado otros dos aceros: el 460Q y el 690Q. A estos dos últimos se les ha aplicado un tratamiento térmico de temple y revenido mientras que el primero es un acero normalizado. En las Tablas 1 y 2 se muestran, respectivamente, las composiciones químicas de los tres aceros así como su microestructura y las propiedades mecánicas de los mismos [2].

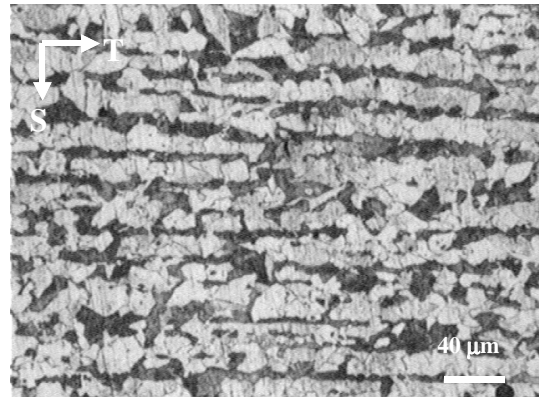
**Tabla 1.** Composición química de los aceros.

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

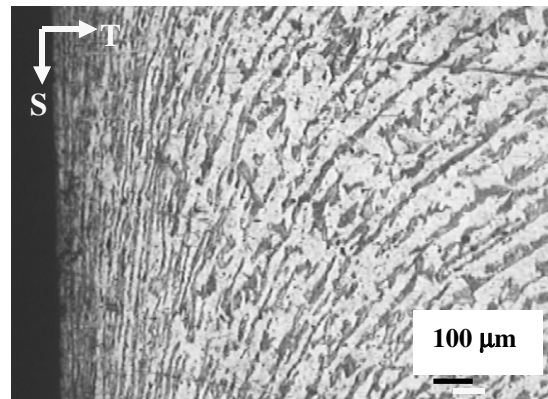
**Tabla 2.** Propiedades mecánicas de los aceros.

	Microestructura	HV	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)
<b>355N</b>	Ferrita-perlita	209	423	602
<b>460Q</b>	Bainita	251	619	685
<b>690Q</b>	Bainita	305	853	866

El análisis de la microestructura del acero 355N mediante microscopía óptica, en el plano perpendicular a la dirección de laminación, permite observar las distintas bandas de ferrita y perlita (Figura 2). Estas bandas se encuentran giradas prácticamente 90° en el borde del agujero (Figura 3) disponiéndose de una manera paralela al mismo.



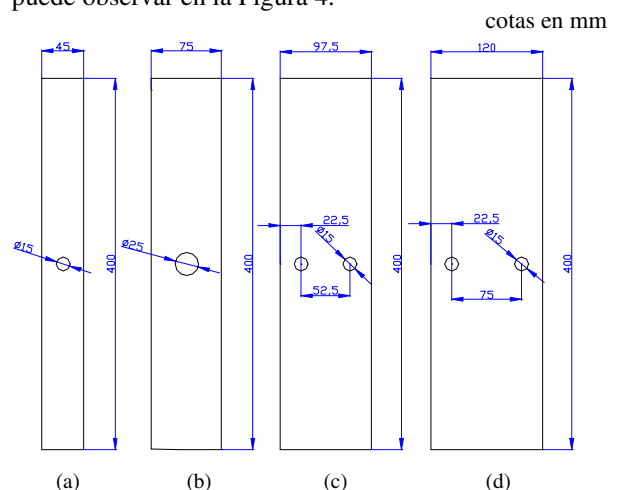
**Fig. 2.** Micrografía óptica del acero 355N.



**Fig. 3.** Bandas de ferrita y perlita giradas 90°.

## 2. COMPORTAMIENTO EN FATIGA DE PROBETAS PUNZONADAS

Para el estudio de la influencia de los diferentes parámetros en el comportamiento a fatiga se han diseñado diferentes probetas en cada caso, como se puede observar en la Figura 4.



**Fig. 4.** Probetas diseñadas para fatiga.

El tipo (a) es el empleado para los ensayos con diferente holgura y diferente dirección de aplicación de la carga, el (b) para los ensayos con diferente diámetro y espesor,

y el (c) y el (d) se emplean para estudiar la influencia del número de agujeros y la distancia entre los mismos.

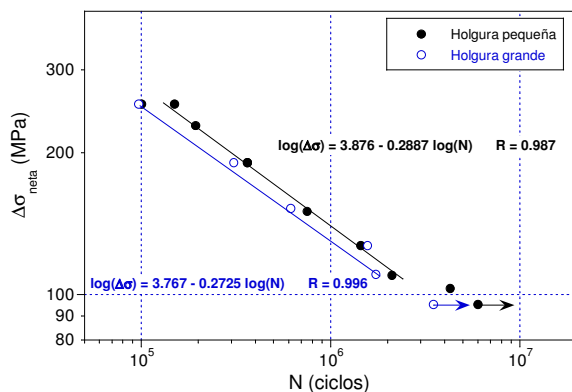
Para determinar el comportamiento a fatiga se obtuvieron las curvas de Wöhler de los diferentes casos. Los valores seleccionados para la tensión máxima en la sección neta (la del agujero) fueron un porcentaje del límite elástico (entre el 25% y el 75%) y la relación entre la tensión máxima y la tensión mínima fue de 0.1 [6].

Estos ensayos se realizaron con una máquina servohidráulica universal de ensayos a una frecuencia de 15 Hz. En todas las gráficas, la  $\Delta\sigma$  que se emplea en la representación es la diferencia entre la tensión máxima y la mínima en la sección neta.

### 2.1.- Influencia de la holgura

Para estudiar la influencia de este parámetro se ha empleado un diámetro de punzón de 15 mm, y dos diámetros de matriz diferentes: el primero de ellos de 16.7 mm y el segundo, más grande, de 17.2 mm.

Como se puede observar en la Figura 5, los resultados obtenidos en cada caso son muy similares entre sí aunque son ligeramente superiores en los ensayos realizados sobre probetas con holgura pequeña. La pendiente de la recta de ajuste es similar en ambos casos y el límite de fatiga se encuentra en torno a un valor  $\Delta\sigma_{th}$  de 100 MPa.

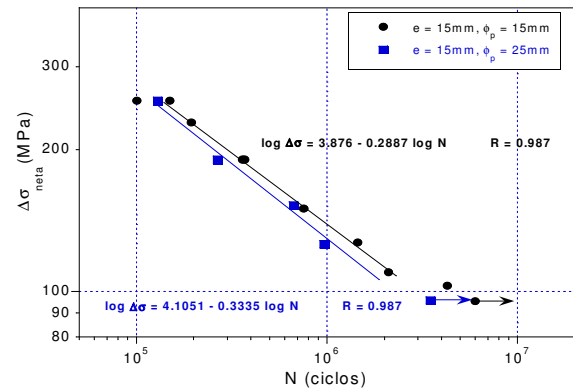


**Fig. 5.** Ensayos de fatiga con diferente holgura.

### 2.2.- Influencia del diámetro

Para estudiar la influencia del diámetro se realizaron agujeros de 15 y 25 mm sobre una chapa de 15 mm de espesor.

Los datos resultantes se observan en la Figura 6 siendo ligeramente superiores los resultados sobre las probetas con agujero de 15 mm. En ambos casos la pendiente es similar y el límite de fatiga se encuentra en torno a los 100 MPa.

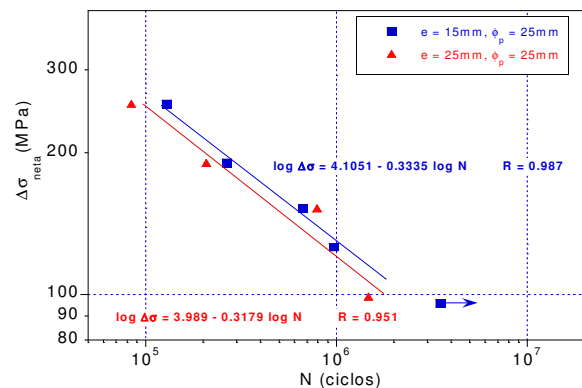


**Fig. 6.** Ensayos de fatiga con diferente diámetro.

### 2.3.- Influencia del espesor

Para el estudio de la influencia del espesor se realizaron ensayos con probetas de 25 mm de espesor sobre las que se había realizado un agujero también de 25 mm.

Estos resultados se han comparado con los obtenidos anteriormente sobre probetas de 15 mm de espesor y 25 mm de diámetro. La holgura en estos dos casos es de 2.7 mm. Los valores obtenidos se presentan en la Figura 7 y también son bastante similares siendo los resultados sobre probetas de 15 mm de espesor superiores a los obtenidos sobre probetas con 25 mm de espesor. La pendiente en ambos casos es similar y el límite de fatiga está en torno a 100 MPa.

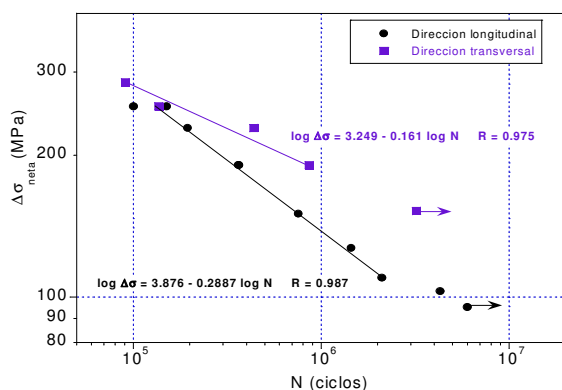


**Fig. 7.** Ensayos de fatiga con diferente espesor.

### 2.4.- Influencia de la dirección de sollicitación

La aplicación de la carga se ha realizado en dos direcciones diferentes, la de laminación de la chapa de la que proceden las probetas y la perpendicular a la misma.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 8 y se observa como la resistencia a fatiga de los ensayos en la dirección transversal es superior a la de la dirección longitudinal, reduciéndose la pendiente casi un 50% y aumentando el límite de fatiga de 100 MPa hasta 150 MPa.

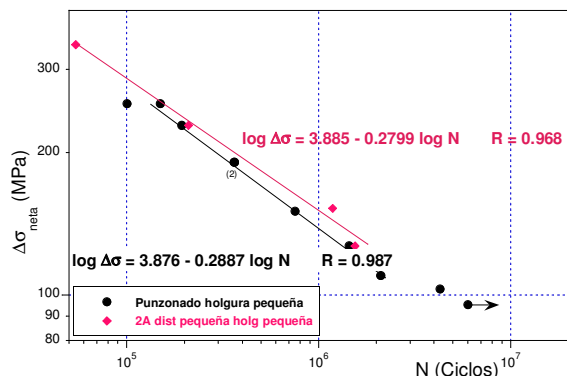


**Fig. 8.** Ensayos de fatiga en diferentes direcciones.

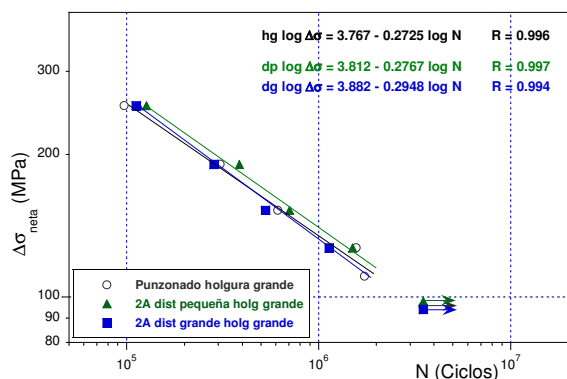
### 2.5.- Influencia del número y posición de los agujeros

Estos ensayos se han realizado con dos tipos de probetas de dos agujeros, según se ve en la Figura 5, y con las dos holguras empleadas en el análisis de la influencia de este parámetro.

Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 9 (holgura pequeña) y 10 (holgura grande) y en todos los casos tanto la pendiente de la recta como el límite de fatiga son muy similares encontrándose este último en torno a 100 MPa. Además, cabe destacar que el mejor comportamiento se ha observado en las probetas de dos agujeros realizados con holgura pequeña.



**Fig. 9.** Ensayos de fatiga en probetas con 2 agujeros y holgura pequeña.



**Fig. 10.** Ensayos de fatiga en probetas con 2 agujeros y holgura grande.

## 3. ENSAYOS INTERRUMPIDOS

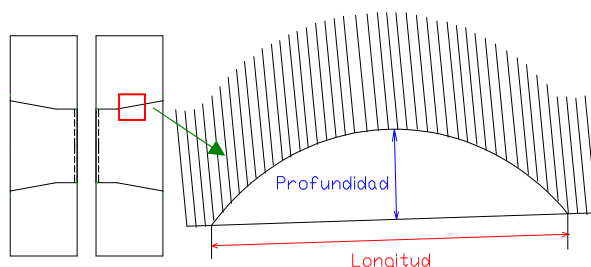
Para la determinación del lugar de inicio de la fisura, y el posterior estudio sobre el desarrollo de la misma se ha llevado a cabo, además del estudio fractográfico de las probetas ensayadas, una serie de ensayos interrumpidos sobre probetas del acero 355N.

Para estos ensayos se ha seleccionado un  $\Delta\sigma$  determinado y conociendo su duración, se realiza el mismo ensayo hasta un número de ciclos diferente en cada caso.

Posteriormente, se introduce la probeta en nitrógeno líquido unos minutos para provocar la rotura frágil del material y finalmente se le aplica un impulso de fuerza para romperla. De esta manera, se puede observar, por medio del microscopio electrónico de barrido (SEM), como ha propagado la fisura hasta ese momento.

En el caso estudiado se ha elegido un  $\Delta\sigma = 150$  MPa, aplicado en la dirección de laminación, sabiendo que el número de ciclos que resistió hasta rotura fue de 750.000.

En la Figura 11 se define la geometría de las fisuras caracterizadas a través de la determinación de su longitud y su profundidad. En la Tabla 3 se pueden observar los valores de esas dimensiones encontradas en los ensayos realizados, las cuales han sido representadas en la Figura 12.

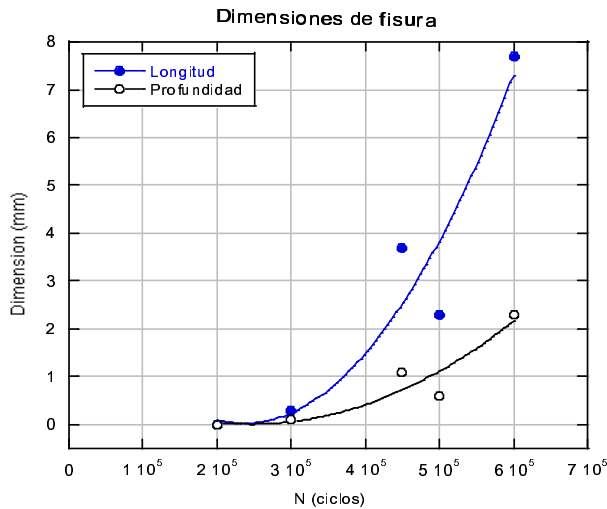


**Fig. 11.** Dimensiones principales de las fisuras.

**Tabla 3.** Dimensiones de las fisuras encontradas en los ensayos interrumpidos.

N (ciclos)	Long (mm)	Prof (mm)	Long/Prof
200.000	0	0	-
300.000	0.3	0.1	3
450.000	3.6	1.1	3.3
500.000	2.2	0.6	3.7
600.000	7.8	2.3	3.4

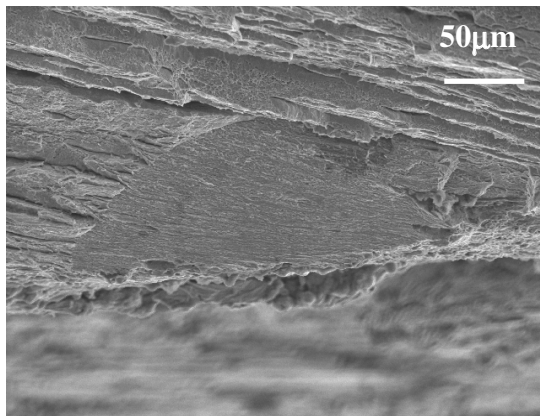




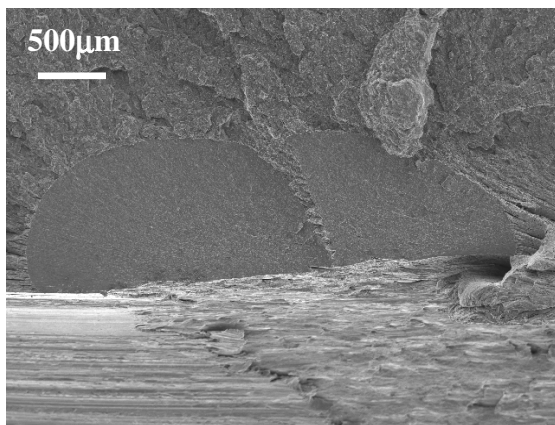
**Fig. 12.** Evolución de las dimensiones de las fisuras

En las Figuras 13, 14 y 15 se muestran las fractografías de algunos casos.

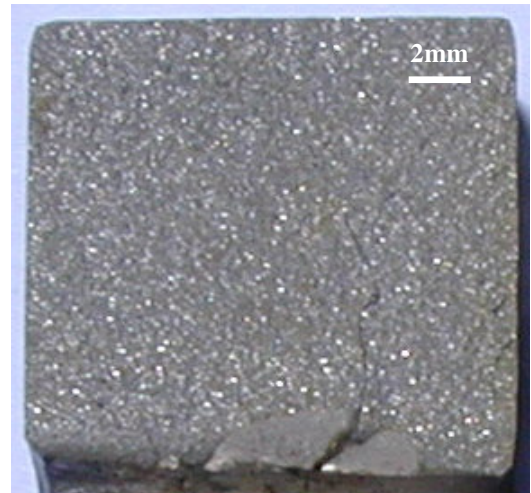
Del estudio fractográfico puede concluirse que el lugar de inicio de la fisura se encuentra siempre en la zona de transición entre las zonas de corte y de desgarro [6], que para este acero está situada a 5 mm de la cara de entrada del punzón.



**Fig. 13.** Micrografía de la fisura a los 300.000 ciclos.



**Fig. 14.** Micrografía de la fisura a los 450.000 ciclos.



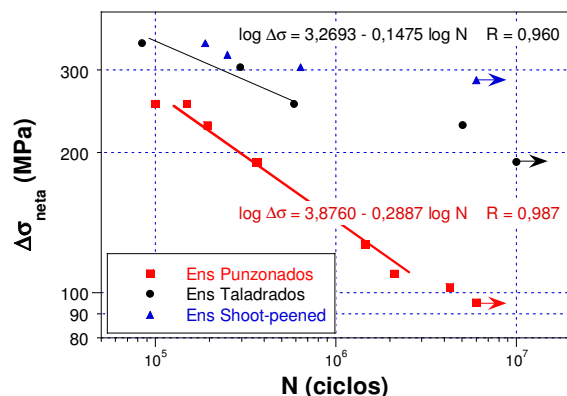
**Fig. 15.** Macrografía de la fisura a los 600.000 ciclos

#### 4. OTRAS ALTERNATIVAS: TALADRADO Y SHOT-PEENING

El interés sobre el punzonado se fundamenta en la mayor rapidez, limpieza, versatilidad y rentabilidad económica que aporta en comparación con otros procesos. Sin embargo, también es importante conocer sus limitaciones respecto a su más directo competidor, como es el taladrado.

Además, para evitar el efecto perjudicial sobre la superficie del agujero se han realizado ensayos similares con probetas sobre las que después de hacer el agujero se aplicó el tratamiento de shot-peening. Este proceso, consiste en “bombardear” la superficie del agujero con pequeñas bolas esféricas que dejan una huella por efecto del impacto. Bajo esta huella, el material se encuentra comprimido intentando volver a su posición inicial. Estas tensiones residuales de compresión, que pueden alcanzar una profundidad de 0.2 mm [7], contribuyen a disminuir el valor de la tensión real durante el ensayo, retrasando la aparición de la fisura.

Los datos resultantes sobre los diferentes materiales y procesos se muestran en las Figuras 16, 17 y 18.



**Fig. 16.** Resultados de los ensayos de fatiga sobre el acero 355N.

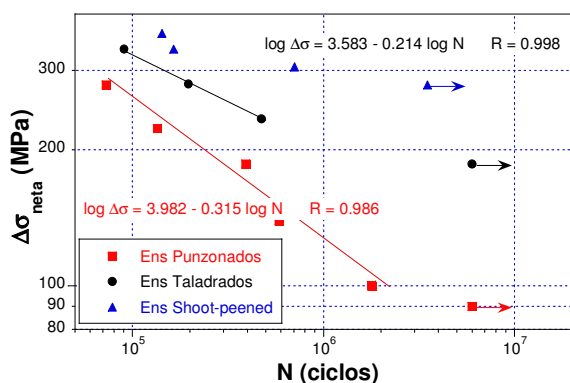


Fig. 17. Resultados de los ensayos de fatiga sobre el acero 460Q.

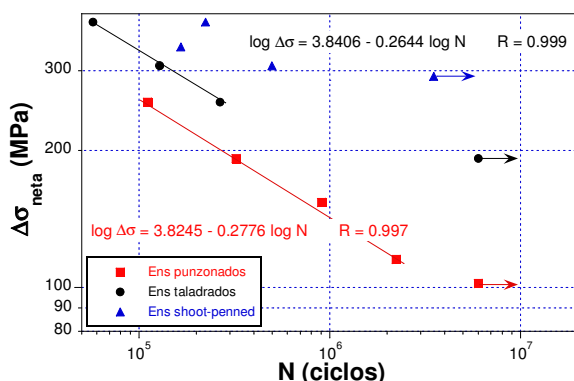


Fig. 18. Resultados de los ensayos de fatiga sobre el acero 690Q.

En la Tabla 4 se muestran los umbrales de propagación de los tres aceros en las distintas condiciones ensayadas y la relación entre ellos, observándose su comportamiento similar para cada uno de los procesos estudiados.

Tabla 4. Umbrales de propagación.

	$\Delta\sigma_{th}(P)$ MPa	$\Delta\sigma_{th}(T)$ MPa	$\Delta\sigma_{th}(SP)$ MPa	$\frac{\Delta\sigma_{th}(tal)}{\Delta\sigma_{th}(pun)}$	$\frac{\Delta\sigma_{th}(s-p)}{\Delta\sigma_{th}(pun)}$
355N	95.2	190	285.5	2.00	3.00
460Q	90	185.7	278.5	2.06	3.09
690Q	102	191	291.7	1.87	2.86

## 5. CONCLUSIONES

El comportamiento en fatiga de los aceros estructurales estudiados no se encuentra fuertemente condicionado por los parámetros propios del proceso. Las pendientes de las rectas de ajuste de las curvas de Wöhler, para cada uno de estos casos, son similares y lo mismo sucede con los límites de fatiga. De todos los parámetros, el más significativo es la holgura, observándose que los ensayos realizados con holgura pequeña presentan mejores resultados que los realizados con holgura grande.

El aspecto más relevante en el comportamiento en fatiga es la dirección de aplicación de la carga. Así, en el caso de que la carga se aplique en la dirección transversal a la dirección de laminación se obtienen mejores resultados que si se aplica en la dirección longitudinal.

La fisura se origina, como se señaló en trabajos anteriores [6], en la transición entre la zona de corte y la zona de desgarro y la relación entre la longitud y la profundidad de la misma, en su evolución, se mantiene torno a tres.

El comportamiento de los tres aceros bajo los efectos del mismo proceso es similar, presentando los tres el mismo umbral de propagación para cada proceso. Así el límite de fatiga para el punzonado es la mitad del valor para el taladrado y la tercera parte del obtenido para el punzonado más shot-peening. Este hecho puede basarse en el daño generado por el punzonado en la superficie del agujero, el cual facilita el inicio del proceso de fisuración. Por otro lado, el punzonado más shot-peening es el que mejores resultados ofrece debido a las tensiones residuales de compresión que provoca y que rebajan el nivel de tensiones real en la superficie del agujero respecto a los otros dos casos.

## 6. 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] Eurocode 3, Design of Steel Structures, CEN-ENV 1993-1-1, 1997, Chapter 9, "Fatigue Design".
- [4] British Standard BS5950 pt 1, 1990, "Structural Use of Steelwork in Buildings: Code of Practice for Design in Simple and Continuous Construction", British Standard Institution 1990.
- [5] Noble CF, Oxley PLB. "Crack formation in blanking and piercing". Int Jnl Prod Res 1963, 2, 265-74.
- [6] Sánchez, L., Pesquera, D. y Gutiérrez-Solana, F. "Comportamiento en fatiga de aceros estructurales punzonados". Anales de la Mecánica de la Fractura. Vol XX. Benicàsim; Abril 2003.
- [7] Shot peening. Aplicaciones. Metal Improvement Company. 2001. 8ª edición.

## 7. 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) y de la Acción Especial concedida por el MCYT "Criterios de comportamiento de aceros estructurales conformados en frío". (Ref. MAT2002-10896-E).