

COMPORTAMIENTO EN FRACTURA DE ALAMBRES ENTALLADOS DE ACERO DE ALTA RESISTENCIA: INFLUENCIA DEL LIMITE ELASTICO

F. J. Ayaso y J. Toribio

Departamento de Ciencia de Materiales, Universidad de La Coruña
E.T.S.I. Caminos, Campus de Elviña, 15192 La Coruña

Resumen. En este artículo se estudia la influencia del proceso de fabricación sobre el comportamiento en fractura de probetas axisimétricas entalladas de aceros perlíticos con distintos grados de trefilado, para lo cual se tomaron muestras de los diferentes escalones de la cadena de fabricación en la factoría EMESA TREFILERIA S.A., desde el alambroón inicial sin trefilar hasta el alambre de pretensado comercial fuertemente trefilado. El *límite elástico* del acero (función del grado de trefilado o nivel de endurecimiento por deformación) se considera la variable fundamental para elucidar las consecuencias del proceso de fabricación en el posterior comportamiento en servicio en presencia de defectos geométricos superficiales de tipo entalla. Además, puesto que en el programa experimental se utilizan muy diferentes geometrías de entalla, el efecto de la *triaxialidad tensional* en el proceso de fractura puede también analizarse, así como la *sensibilidad a las entallas* de los distintos alambres.

Abstract. This paper deals with the influence of the manufacturing process on the fracture behaviour of axisymmetric notched specimens of pearlitic steels with different degrees of cold drawing. To this end, samples from different stages of the manufacturing chain were obtained at EMESA TREFILERIA S.A., from the initial hot rolled material (not cold drawn at all) to the final prestressing steel (heavily cold drawn). The *yield strength* of the steel (which is a function of the cold drawing degree or strain hardening level) is considered as the fundamental variable to elucidate the consequences of the manufacturing process on the posterior service behaviour in the presence of geometric defects such as notches. In addition, since very different notched geometries are used in the experimental programme, the effect of the *stress triaxiality* on the fracture process can also be analyzed, as well as the *notch sensitivity* of the wires.

1. INTRODUCCION

El análisis de procesos de fractura en geometrías entalladas tiene gran importancia en Mecánica de Fractura relativa a materiales estructurales, no sólo por razones científicas, sino también por motivos de índole ingenieril. Desde el punto de vista científico, los defectos de tipo entalla (es decir, con radio de curvatura distinto de cero) generan una distribución tensional triaxial en las proximidades de la entalla (distribución no singular, a diferencia del caso de las geometrías fisuradas), lo cual permite un análisis detallado de la influencia del estado tensional y de la triaxialidad sobre los procesos de fractura dúctil [1], así como sobre los mecanismos de fractura a nivel microscópico [2-4]. En ingeniería, las entallas pueden estar presentes en el material debido a defectos previos en el material o a condiciones particulares de trabajo (por ejemplo, en el caso de anclajes para hormigón pretensado) [5].

En el caso del acero de pretensado, el proceso de fabricación comercial parte de un alambroón laminado en caliente al que se le somete a un proceso de trefilado progresivo durante el cual su diámetro disminuye y su límite elástico aumenta debido a un mecanismo de endurecimiento por deformación. Así pues, aunque el producto final (acero de pretensado comercial) es un material de alta resistencia, las consecuencias del trefilado no son aún bien conocidas desde el punto de vista de su comportamiento en fractura.

En este artículo se aborda el estudio del proceso de fractura en alambres *entallados* de acero de alta resistencia con distinto límite elástico producido por un trefilado progresivo, lo cual supone una continuación de las investigaciones desarrolladas previamente [6,7] relativas al comportamiento en fractura en aire [6] y ambiente agresivo [7] de alambres *fisurados* de aceros perlíticos con distinto grado de trefilado.

2. MATERIAL EMPLEADO.

2.1 Acero perlítico trefilado.

Los materiales empleados fueron aceros con un contenido de carbono del 0,8%, el cual se corresponde con la composición eutectoide. Como consecuencia de ello la estructura cristalina es *perlítica* con finas láminas de ferrita en los bordes de las diferentes colonias de perlita. En la Tabla 1 se muestra la composición química de los aceros objeto de estudio.

Tabla 1. Composición química del acero (%).

C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	V
0.80	0.69	0.23	0.012	0.009	0.004	0.265	0.06

Las muestras proceden de los diferentes escalones de la cadena de fabricación en la factoría EMESA TREFILERÍA S.A. (Grupo ACERIALIA), desde el alambroón inicial sin trefilar hasta el alambre de pretensado comercial fuertemente trefilado.

El proceso de trefilado consiste básicamente en un tratamiento mecánico de endurecimiento por deformación en el que la masa metálica es sometida a tensiones orientadas en sentidos privilegiados, produciendo reducciones en las dimensiones transversales de los alambres y un aumento en la correspondiente dimensión axial. En este proceso no solamente se ven afectados la forma y aspecto exterior sino que también se actúa sobre la estructura cristalina del acero al ser orientados los granos en la dirección del trefilado (dirección principal de deformación). El resultado es un endurecimiento del diagrama tensión-deformación por aumento del límite elástico y de la resistencia.

El acero de partida es un alambroón de 12 mm de diámetro que constituye la materia prima de fabricación de aceros trefilados. El alambroón ha sufrido un proceso de deformación en frío hasta llegar al producto final, alambre liso de 7 mm de diámetro el cual se emplea para la construcción de hormigón pretensado.

2.2 Tipo de muestras.

Las probetas que han sido empleadas para llevar a cabo los ensayos son varillas cilíndricas entalladas de acero perlítico trefilado y correspondientes a los diferentes pasos que conforman el tren de trefilado. Éstas son de una longitud aproximada de unos 30 cm, mientras que el diámetro de las mismas es función del paso de trefilado correspondiente al que pertenece cada probeta. En la Tabla 2 se indica el valor del diámetro de las probetas en función del paso de trefilado así como la sección transversal A_i del mismo. Cabe señalar que en el caso del alambroón de partida -acero 0- y para el alambre obtenido en el primer paso de trefilado -acero 1- las probetas correspondientes presentaban inicialmente ciertas imperfecciones superficiales, por ello han sido rectificadas mediante torneado para garantizar la correcta axialidad de la carga aplicada externamente durante el

ensayo de tracción simple. Por esta razón en la Tabla 2 además del diámetro original de los mismos se indica, para estos dos aceros, entre paréntesis el valor correspondiente al diámetro del alambre una vez rectificado.

Como una primera medida del grado de trefilado se ha indicado también en la Tabla 2 un parámetro adimensional que resulta del cociente entre el valor del diámetro correspondiente a cada una de las etapas del proceso de trefilado (D_i) y el correspondiente al alambroón inicial de partida (D_0):

$$\frac{D_i}{D_0} \tag{1}$$

Tabla 2. Reducciones de sección en el acero perlítico trefilado.

Acero	D_i (mm)	A_i (mm ²)	D_i/D_0
0	12.00 (11.25)	113.09 (99.40)	1
1	10.85 (10.50)	92.46 (86.59)	0.9
2	9.80	75.43	0.82
3	8.95	62.81	0.74
4	8.20	52.81	0.68
5	7.55	44.77	0.63
6	7.00	38.48	0.58

En la Tabla 3 se muestra el valor de la reducción de sección específica y acumulada para cada una de las etapas del proceso de trefilado. Se define la reducción de sección específica como aquella que se calcula respecto a la sección del acero correspondiente al paso de trefilado anterior (A_{i-1}), mientras que la reducción de sección acumulada se obtiene al dividir la sección correspondiente a cada paso de trefilado (A_i) por la correspondiente al alambroón inicial (A_0). Las expresiones que definen la reducción de sección específica y acumulada (en %) son, respectivamente:

$$\frac{A_{i-1} - A_i}{A_{i-1}} \times 100 \tag{2}$$

$$\frac{A_0 - A_i}{A_0} \times 100 \tag{3}$$

Tabla 3. Reducción de sección específica y acumulada en los diferentes pasos de trefilado.

Acero	Específica (%)	Acumulada (%)
0	-	-
1	18.24	18.24
2	18.42	33.30
3	16.60	44.37
4	16.05	53.30
5	15.22	60.41
6	14.05	65.98

Todas las probetas llevan mecanizada una entalla aproximadamente en su zona central. Esta entalla se corresponde con 4 geometrías diferentes, las cuales denominan A, B, C y D en función del valor de su radio de curvatura y de su profundidad en el alambre de acero correspondiente. Sus características son:

- * *Entalla tipo A*: pequeña profundidad y radio de curvatura pequeño.
- * *Entalla tipo B*: gran profundidad y radio de curvatura pequeño.
- * *Entalla tipo C*: pequeña profundidad y gran radio de curvatura.
- * *Entalla tipo D*: gran profundidad y gran radio de curvatura.

Cada una de las entallas ha sido mecanizada en las varillas cilíndricas, e inicialmente lisas, que se han extraído del tren de trefilado, incluido el alambón inicial -acero 0-. La entalla correspondiente (A, B, C ó D) ha sido mecanizada manteniendo constantes las relaciones A/D y R/D a lo largo de los diferentes pasos de trefilado, siendo A la profundidad de la entalla, R el radio de curvatura de la misma y D el diámetro nominal del acero correspondiente. En la siguiente Fig. 1 se muestra un diagrama en el cual se representa en el eje de ordenadas la cantidad adimensional A/D y en el eje de abscisas la magnitud adimensional R/D, de tal forma que en el se encuentran representados los cuatro tipos de entallas: A, B, C y D. Se observa que la relación profundidad de entalla-diámetro nominal de la probeta (A/D) es de valor 0.30 para los aceros con entallas B y D mientras que para los aceros con entallas A y C toma un valor de 0.10. En cuanto a la relación R/D es de valor 0.40 para el caso de los aceros con entallas C y D, mientras que para los aceros con entallas tipo A y B es de 0.03 y 0.05 respectivamente.

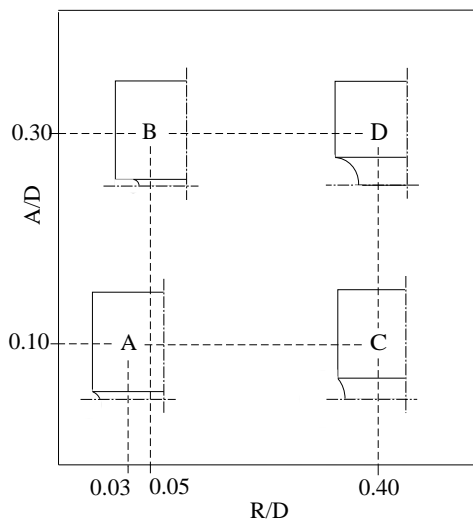


Fig. 1. Geometría de los cuatro tipos de entallas.

En lo que se refiere a la nomenclatura empleada para la identificación de las diferentes probetas se ha seguido el criterio que se expone a continuación: los aceros se distinguen por el paso de trefilado al que corresponde cada uno de ellos excepto el alambón inicial que, como

no ha pasado por paso alguno, se identifica con el número 0. De esta forma el acero correspondiente al paso enésimo de trefilado se identifica con el número n.

Para llevar a cabo los ensayos en laboratorio se dispone de tres probetas por cada acero con su correspondiente entalla exceptuando el acero perteneciente al primer paso de trefilado -acero 1- del cual sólo se dispone de dos elementos por escasez del mismo.

3. MÉTODO DE ENSAYO.

Las probetas se han llevado hasta la rotura en la máquina de ensayo dinámica INSTRON. Para ello se han colocado las probetas entre las mordazas hidráulicas de la máquina, las cuales están perfectamente alineadas entre sí, y ello implica que la probeta también lo está durante el ensayo y por lo tanto su comportamiento no se ve afectado por esfuerzos de flexión provocados por posibles defectos de alineación. En las proximidades de la entalla de cada probeta se colocó el extensómetro de tal forma que las dos galgas extensométricas del mismo quedaron situadas de manera equidistante del centro de entalla, pero suficientemente separadas de la misma para obtener una lectura de desplazamiento relativo lejos de la influencia de la concentración tensional provocada por la entalla y la plastificación consiguiente.

La variable de control de los ensayos fue la velocidad de sollicitación del actuador hidráulico de la máquina de ensayo, elegida única para cada tipo de entalla independientemente del acero en que ésta se encuentra mecanizada, siendo dicha velocidad de sollicitación la indicada en la Tabla 4.

Tabla 4. Velocidades de sollicitación.

Entalla	A	B	C	D
v (mm/s)	0.01	0.002	0.025	0.005

Desde el momento en que comienza el ensayo, y hasta la finalización del mismo, se recogen continuamente las lecturas correspondientes al valor de la carga y del desplazamiento de las galgas extensométricas. Los datos recogidos son posteriormente tratados para obtener los valores de la carga *F* (kN) y del desplazamiento de las galgas extensométricas en contacto con la probeta *u* (mm) en cada instante del ensayo; posteriormente se reflejarán dichos resultados en unas gráficas F-u.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

De todos los ensayos realizados en el laboratorio, 92 en total, se representan a continuación los registros carga-desplazamiento obtenidos; para ello se ha elegido como curva representativa de cada terna de probetas la curva intermedia correspondiente. Sin embargo los resultados de los ensayos y su análisis se hace en función del promedio de los mismos (la media de la terna dada). Estos resultados se reflejan en las Figs. 2 a 9.

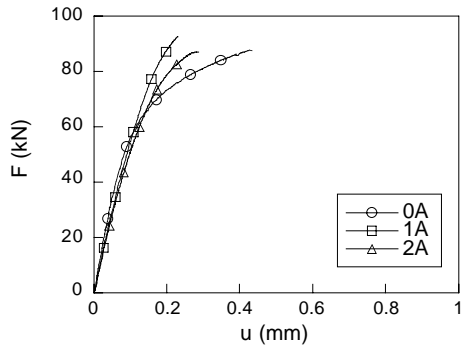


Fig. 2. Curva F-u (débilmente trefilados, entalla A).

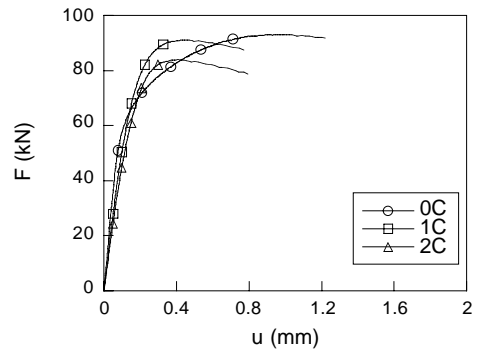


Fig. 6. Curva F-u (débilmente trefilados, entalla C).

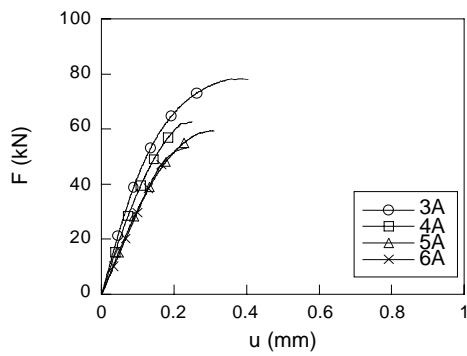


Fig. 3. Curva F-u (fuertemente trefilados, entalla A).

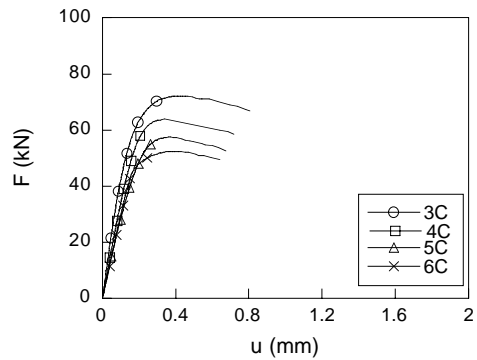


Fig. 7. Curva F-u (fuertemente trefilados, entalla C).

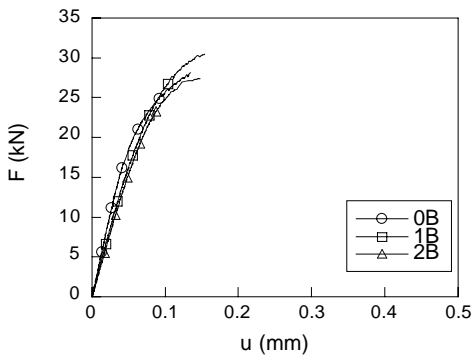


Fig. 4. Curva F-u (débilmente trefilados, entalla B).

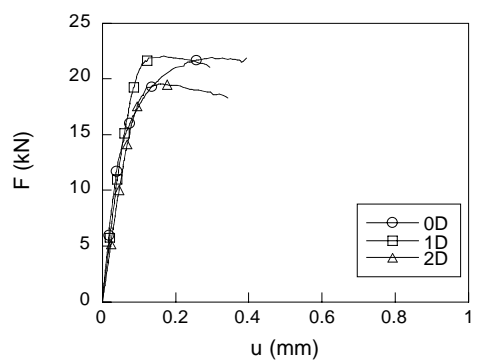


Fig. 8. Curva F-u (débilmente trefilados, entalla D).

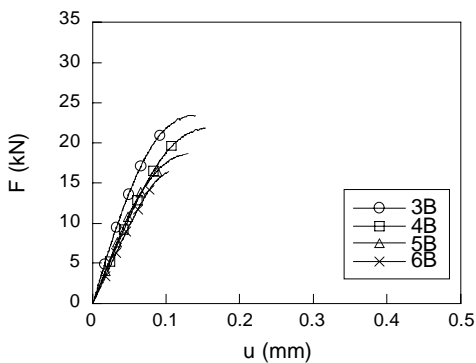


Fig. 5. Curva F-u (fuertemente trefilados, entalla B).

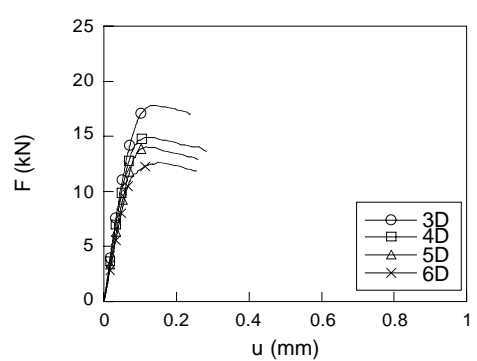


Fig. 9. Curva F-u (fuertemente trefilados, entalla D).

Una vez obtenidas las gráficas correspondientes a la carga aplicada en los extremos de las probetas, así como de la deformación de las galgas extensométricas en las proximidades de la entalla, se observan diferencias entre aceros idénticos pero con distinto tipo de entalla.

En primer lugar se puede observar claramente que únicamente los aceros con entallas tipo C y D son los que presentan un tramo de descenso de carga tras la carga máxima F_{max} ; por el contrario, los aceros con entallas tipo A y B no presentan tramo de descenso alguno, puesto que el momento crítico (fractura final) corresponde a carga máxima.

Por tanto se puede decir que el comportamiento del acero trefilado es tanto más dúctil cuanto mayor es el radio de entalla que posee ó, por el contrario, el acero se comporta de una manera tanto más frágil cuanto menor es el radio de curvatura de la entalla correspondiente.

En las Tablas 5 a 8 se indican los valores medios obtenidos en los ensayos realizados, reflejándose en las mismas los valores medios obtenidos de la carga máxima F_{max} , de la carga correspondiente al límite elástico F_Y , así como la tensión neta correspondiente a la carga máxima σ_{max} , y los valores de la rigidez k .

Tabla 5. Parámetros del acero con entalla tipo A

Acero	F_Y (kN)	F_{max} (kN)	σ_{max} (GPa)	k (kN/mm)
0A	37.48	86.52	1.368	699.53
1A	46.42	93.72	1.724	569.30
2A	43.67	84.96	1.784	523.34
3A	40.92	75.17	1.901	424.84
4A	39.48	64.88	1.927	355.12
5A	35.17	58.26	2.013	297.18
6A	48.70	52.71	2.124	287.89

Tabla 6. Parámetros del acero con entalla tipo B.

Acero	F_Y (kN)	F_{max} (kN)	σ_{max} (GPa)	k (kN/mm)
0B	16.14	28.25	1.732	383.17
1B	17.70	30.61	2.079	323.39
2B	17.51	27.20	2.475	297.63
3B	14.93	23.46	2.300	275.92
4B	14.47	21.40	2.448	225.67
5B	13.00	18.76	2.525	204.38
6B	13.88	15.74	2.551	193.01

Tabla 7. Parámetros del acero con entalla tipo C.

Acero	F_Y (kN)	F_{max} (kN)	σ_{max} (GPa)	k (kN/mm)
0C	40.99	93.52	1.432	674.52
1C	47.43	91.06	1.683	520.11
2C	45.72	83.89	1.777	473.96
3C	42.33	73.36	1.822	423.35
4C	39.95	63.51	1.922	340.25
5C	34.60	57.34	1.975	293.74
6C	44.79	52.64	2.147	283.99

Tabla 8. Parámetros del acero con entalla tipo D.

Acero	F_Y (kN)	F_{max} (kN)	σ_{max} (GPa)	k (kN/mm)
0D	10.27	21.82	1.340	315.95
1D	14.08	21.83	1.576	263.57
2D	13.29	19.47	1.608	217.82
3D	12.47	17.80	1.791	212.40
4D	10.27	14.85	1.804	202.28
5D	10.33	14.01	1.888	178.12
6D	10.82	12.60	2.042	160.61

En la Fig. 10 se observa la carga correspondiente al límite elástico F_Y , en la cual se diferencian dos grupos de aceros; uno correspondiente a los aceros con entallas de pequeña profundidad (A y C) que presentan los valores más elevados de F_Y , siendo su evolución con el trefilado muy parecida; en el otro grupo se engloban los dos aceros restantes con entallas de gran profundidad (B y D) cuyos valores de F_Y son menores.

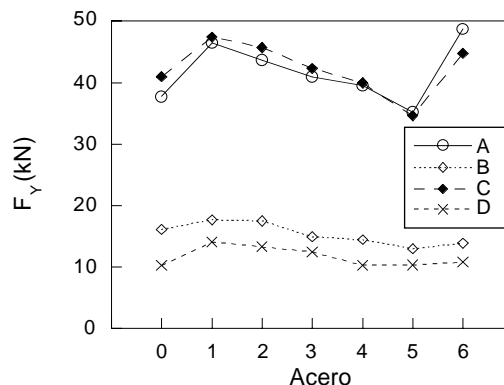


Fig. 10. Evolución de F_Y con el grado de trefilado

Otro aspecto a reseñar en las gráficas presentadas es la carga máxima F_{max} (Fig. 11). Los valores más altos se obtienen para las entallas A y C (ligeramente mayores en la A, salvo para el alambrcn). En lo que se refiere a las entallas B y D, la carga máxima es menor que las anteriores, y superior en B que en D.

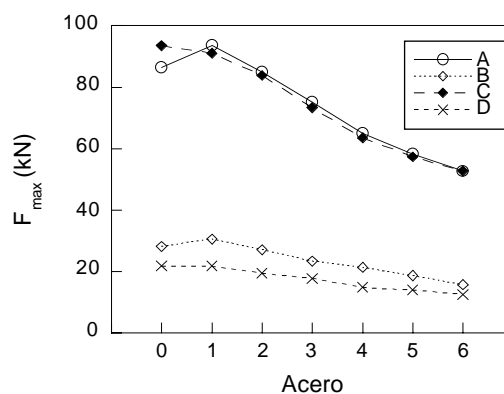


Fig. 11. Evolución de F_{max} con el grado de trefilado.

Si se dividen los valores correspondientes a la F_{max} por las secciones netas medidas en el fondo de cada entalla Se se obtienen las tensiones netas correspondientes a la carga máxima aplicada σ_{max} :

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{Se} \quad (4)$$

que se representa en la Fig. 12 para todos los aceros y tipos de entalla. Se observa claramente que el acero con entalla tipo B es el que toma los valores más altos de la tensión neta. En todos ellos hay un evidente incremento en la σ_{max} a medida que aumentan los pasos de trefilado, exceptuando el caso del acero 2B, en el cual el valor de la σ_{max} es superior a la de los dos aceros que siguen: 3B y 4B. La explicación a este hecho se encuentra en la sección en el fondo de entalla en la terna del acero 2B, la cual, por un defecto en el mecanizado, es, por término medio, un 8.87 % menor que el valor teórico.

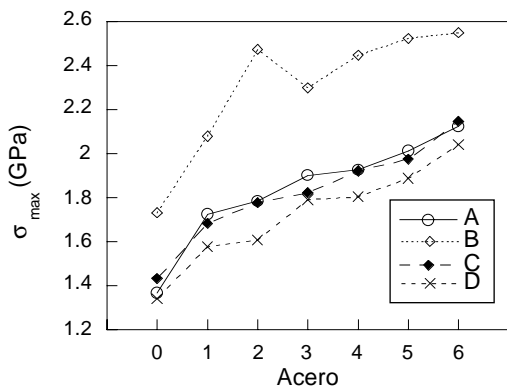


Fig. 12. Evolución de la σ_{max} con el grado de trefilado.

En la Fig. 13 se representan los valores medios de la rigidez k de los aceros según el grado de trefilado y el tipo de entalla. Hay un claro descenso de k con el grado de trefilado y con independencia de la entalla. En las entallas A y C (profundidad pequeña) la rigidez es claramente mayor que en las entallas B y D (gran profundidad), siendo la tipo D la de rigidez mínima.

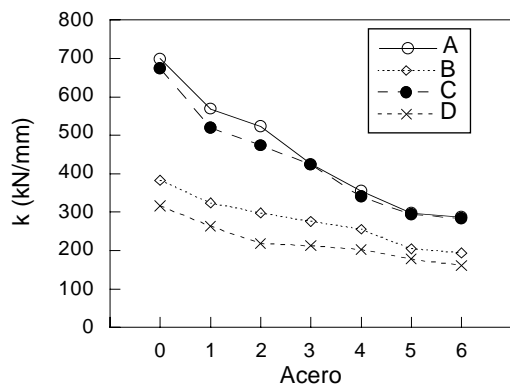


Fig. 13. Evolución de la rigidez con el trefilado.

El área total bajo la curva F-u representa una medida de la energía suministrada por medio de la máquina de ensayo a cada probeta durante los correspondientes ensayos hasta producirse la rotura. Dichos valores se representan en la Tabla 9.

Tabla 9. Área (energía) bajo las curvas F-u

Acero	Entalla			
	A (J)	B (J)	C (J)	D (J)
0	27,63	2,64	102,85	8,18
1	13,97	3,18	60,03	4,98
2	15,14	2,69	56,82	5,13
3	16,07	2,14	53,25	3,40
4	11,61	2,08	32,51	3,58
5	11,62	1,60	33,55	2,96
6	7,36	0,85	27,4	2,47

El área bajo las curvas F-u es máxima para el acero 0 y disminuye con el grado de trefilado (para todas las entallas) hasta alcanzar su valor mínimo en el acero 6. Esta evolución (salvo pequeñas excepciones debido a la dispersión experimental) se aprecia en las Figs. 14 y 15.

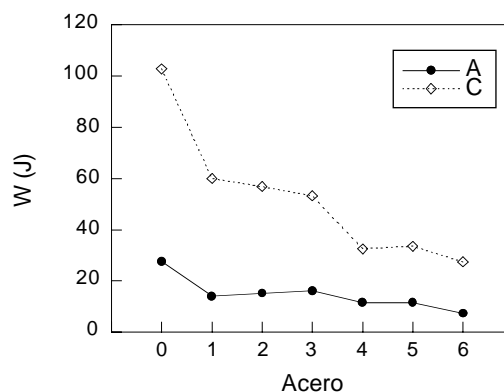


Fig. 14. Energía (W) suministrada a los aceros con entallas tipo A y C.

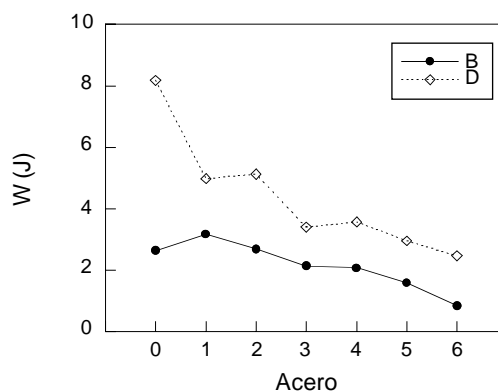


Fig. 15. Energía (W) suministrada a los aceros con entallas tipo B y D.

Finalmente, se ha evaluado el *factor de sensibilidad a las entallas* (FSE) para cada uno de los aceros y tipo de geometría, definido mediante el cociente entre la tensión máxima obtenida en el ensayo de fractura sobre probeta entallada (4) y la tensión máxima que se alcanza en el ensayo de fractura utilizando probeta lisa (es decir, la tensión de rotura en el ensayo de tracción simple). Dicho factor se representa en la Fig. 16, donde se observa que es claramente mayor en la geometría B (radio mínimo, profundidad máxima), lo que demuestra el efecto de aumento de la tensión crítica que produce la mayor triaxialidad tensional en este caso.

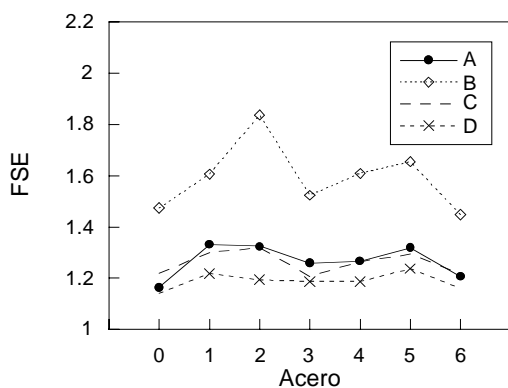


Fig. 16. Factor de sensibilidad a las entallas para todos los aceros y tipos de geometría de entalla.

5. CONCLUSIONES.

En los ensayos se han empleado probetas entalladas de acero perlítico trefilado, correspondiéndose las mismas con los diferentes pasos que conforman el tren de trefilado. Las entallas se agrupan en cuatro grupos diferentes las cuales abarcan las esquinas de un cuadrilátero en el interior del cual se encuentran la mayoría de las geometrías de entallas posibles dentro de un orden referente a su radio de curvatura y a su profundidad con relación al diámetro de la varilla de acero correspondiente a cada paso de trefilado.

Las diferentes probetas entalladas se han ensayado hasta la rotura, obteniéndose unas gráficas F-u que reflejan ambas variables a lo largo del ensayo. Las curvas obtenidas difieren unas de otras según sea el paso de trefilado al que corresponde el acero dado y también según sea el tipo de entalla que éstos tienen mecanizada en su zona central. Por lo tanto los resultados obtenidos en cada probeta son función del paso de trefilado y del tipo de entalla correspondiente.

En un primer examen de los registros F-u obtenidos en los ensayos realizados se observa que solamente los aceros con entallas tipo C y D, cuya única característica común es un gran radio de curvatura, presentan un

tramo de descenso de carga con aumento de la deformación una vez que se ha alcanzado la carga máxima F_{max} durante el ensayo. Para los aceros con entallas clase A y B -radio de curvatura pequeño- no se produce descenso de carga apreciable. Se ve, pues, que la geometría de la entalla provoca que el material se comporte de una forma más dúctil cuanto más grande es su radio de curvatura, ó visto desde el otro extremo, el comportamiento del material es tanto menos dúctil cuanto menor es el radio de curvatura de la entalla.

En cada uno de los ensayos realizados se ha registrado el valor de la carga máxima aplicada a cada probeta F_{max} durante la duración del mismo. Los resultados reflejan que los aceros con entallas de pequeña profundidad de entalla -entallas A y C- alcanzan una mayor F_{max} que aquellos que poseen mecanizada una entalla de gran profundidad -entallas tipo B y D- siendo los aceros con entallas tipo D de gran radio de curvatura y gran profundidad aquellos en los que se registra los menores valores para la F_{max}

A la hora de valorar la tensión neta σ_{max} , se obtiene que los mayores valores (con diferencia) los alcanza el acero con entalla tipo B, independientemente del paso de trefilado que se trate, lo que no ocurría con los registros de carga máxima. Los aceros con entallas tipo D presnetan en este caso los valores mínimos para todas las geometrías, al igual que ocurría en lo referido a carga máxima en el ensayo.

En cuanto a los valores de la rigidez k, los valores más elevados para todos los aceros, independientemente del paso de trefilado que se trate, se corresponden con aquellos aceros con entallas tipo A y C. La conclusión a tomar en este caso es que los aceros provistos de entallas con profundidad reducida poseen una rigidez mayor que los aceros con entallas de gran profundidad, independientemente del radio de curvatura de entalla, si bien existen leves excepciones a esta tendencia general.

Un parámetro de interés que se ha calculado a partir de las gráficas carga-deformación -gráficas F-u- es el área encerrada bajo el mencionado registro, la cual es una representación de la cantidad de energía exterior que se tiene que suministrar para realizar los ensayos a las diferentes probetas entalladas. Como consecuencia, se observa que en aquellos aceros con entallas de pequeña profundidad es necesario suministrar exteriormente una cantidad de energía -para llevar a cabo los ensayos- superior a la necesaria para los aceros con entallas de gran profundidad.

El factor de sensibilidad a las entallas es máximo en la geometría B (radio mínimo, profundidad máxima), lo que demuestra el efecto de aumento de la tensión crítica que produce la mayor triaxialidad tensional en este caso.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por las instituciones CICYT (Proyecto MAT97-0442) y Xunta de Galicia

(Proyectos XUGA 11801B95 y XUGA 11802B97). Los autores agradecen dicha financiación, así la cesión de los aceros por parte de EMESA TREFILERIA S.A.

REFERENCIAS

- [1] Hancock, J.W. & Brown, D.K. On the role of strain and stress state in ductile failure. *J. Mech. Phys. Solids*, **31**, pp. 1-24, 1983.
- [2] Beremin, F.M. Influence de la triaxialité des contraintes sur la rupture par déchirement ductile et la rupture fragile par clivage d'un acier doux. *J. Mécanique Appliquée* **4**, pp. 327-342, 1980.
- [3] Pineau, A. Review of fracture micromechanisms an a local approach to predicting crack resistance in low strength steels, *ICF5-Advances in Fracture Research*, ed. D. Francois, Pergamon, Oxford, pp. 553-577, 1981.
- [4] Beremin, F.M. Study of fracture criteria for ductile rupture of A508 steel, *ICF5-Advances in Fracture Research*, ed. D. Francois, Pergamon, Oxford, pp. 809-816, 1981.
- [5] Elices, M. Fracture of steels for reinforcing and prestressing concrete, *Fracture Mechanics of Concrete*, eds. G.C. Sih and A. DiTommaso, Martinus Nijhoff, Dordrecht, The Netherlands, pp. 226-271, 1985.
- [6] Toledano, M. Fatiga y fractura de aceros perlíticos con distinto grado de trefilado. Tesis Doctoral, Universidad de La Coruña, 1998.
- [7] Ovejero, E. Fractura en ambiente agresivo de aceros perlíticos con distinto grado de trefilado. Tesis Doctoral, Universidad de La Coruña, 1998