

Influencia del grado de deformación en frío en el tamaño de grano y en la resistencia a la corrosión del acero F-1110

Javier Tortosa, Ester M^a Palmero, M^a Dolores La Rubia*,
Alfredo Sánchez, Antonio Sánchez

*Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales.
Universidad de Jaén. Campus Las Lagunillas s/n., 23071, Jaén*
(*) mdrubia@ujaen.es

Resumen

En este trabajo se ha estudiado la evolución que sufre el tamaño de grano del acero al carbono F-1110 para distintos grados de deformación en frío, a partir de su estado de recocido, libre de tensiones y de cualquier acritud. La deformación en frío se ha conseguido utilizando una máquina universal de ensayos y los distintos grados de deformación se han ajustado al intervalo comprendido entre la estricción y la rotura. La posterior observación al microscopio óptico de las zonas deformadas, previa preparación metalográfica, nos ha permitido medir la variación en el tamaño de grano. Finalmente, se ha evaluado la influencia del grado de deformación en la resistencia a la corrosión del acero.

INTRODUCCIÓN

Generalmente, se utiliza la temperatura de recristalización como barrera para separar los procesos de deformación en frío y deformación en caliente. Dicha temperatura se establece aproximadamente en $0,5 T_f$, siendo T_f la temperatura de fusión del metal expresada en grados Kelvin. Controlando la deformación se puede evaluar el grado de endurecimiento del metal. Por regla general, se mide la deformación mediante el porcentaje de trabajo en frío o estricción .

Durante el proceso de deformación en frío se produce un alargamiento de los granos en la dirección de la aplicación de la carga y se genera una estructura fibrosa. A medida que avanza el proceso, los granos, además de alargarse, giran haciendo que ciertas direcciones y planos cristalográficos queden alineados. Debido a esto se desarrollan ciertas orientaciones causando un comportamiento anisotrópico (Askerland D.R, 2001,Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Thomson)

Dentro de los factores que aceleran la corrosión se encuentran principalmente la naturaleza del metal y del medio corrosivo. Sin embargo, otros factores como el grado de deformación inducido en el material, son de gran importancia ya que aceleran dicho proceso (France et al. 1970, Corrosion, 26: 189–199).

El objetivo de este trabajo es estudiar la influencia que ejerce la deformación en frío en el tamaño de grano y en la susceptibilidad al ataque corrosivo del acero F-1110.

MATERIAL Y MÉTODOS

Acero ensayado y probetas

Para la realización del presente trabajo, se ha utilizado el acero F-1110, cuyas características se recogen en las **Tablas 1 y 2**.

Tabla 1. Composición química del acero F-1110.

Denominación del acero	%C	%Mn	%P	%S	%N
F-1110	0,20	0,50	<0,045	<0,045	0,009

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero F-1110.

Denominación del acero	Resistencia a la Tracción (MPa)	Límite elástico al 0,2% mín. (MPa)	Alargamiento mín. (%)	Dureza máx. (HB)
F-1110	450	330	10	140

En la **Figura 1**, se muestra la probeta utilizada en los ensayos para la consecución de la deformación (ensayo de tracción). Para poder realizar una correcta preparación metalográfica de las zonas deformadas, no se ha podido utilizar una probeta normalizada, lo cual no influye en los resultados obtenidos.

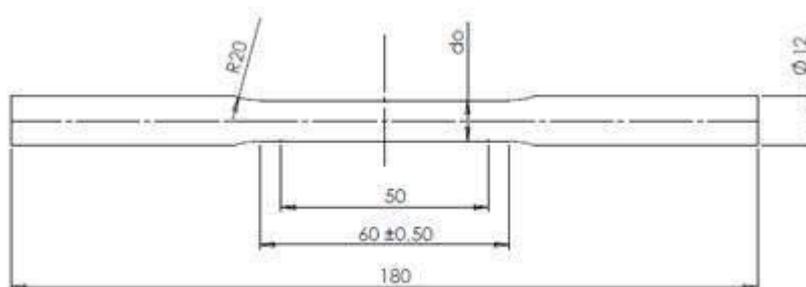


Figura 1. Dimensiones de la probeta ensayada en mm.

Procedimiento de deformación

El proceso llevado a cabo consiste en la deformación plástica de una serie de siete probetas, aplicándoles diferentes grados de deformación. La deformación se obtiene realizando su tracción longitudinal empleando la máquina universal de ensayos *MTS 810 Material Test System* de accionamiento hidráulico que permite medir, con la frecuencia deseada, la carga que está actuando sobre la probeta, así como el alargamiento producido. Todos los ensayos se han realizado controlando el desplazamiento del actuador de la máquina universal a una velocidad constante de 0,2mm/min. Para la adquisición de datos se ha utilizado el software *Station Manager* y *Test Works 4*. Los ensayos se han interrumpido antes de que la probeta sufriera la fractura. La zona a estudiar es aquella en la que se ha producido la estricción.

Preparación metalográfica

Posteriormente, se ha procedido a la preparación metalográfica de las zonas deformadas y la consiguiente observación al microscopio. Para la toma de muestra, se ha procedido a realizar dos cortes transversales y un corte longitudinal de la zona de estricción, usando una máquina tronzadora, modelo *StruersLaboto*. La muestra metálica se ha embutido en una resina termoplástica mediante una prensa *Struers, modelo Predopress*. A continuación, se procede al desbaste con el fin de eliminar todo lo que pudiera obstaculizar su examen, a la vez que se obtiene una superficie plana con pequeña rugosidad. Este proceso se ha realizado con un papel abrasivo *Silicon Carbide Paper 220* y posteriormente con una máquina desbastadora. La etapa de pulido tiene por objeto obtener una superficie especular, para lo cual se ha utilizado la pulidora *Struers, modelo Tegrapol-11* y dosificador *TegraDoser-5*. Tras estas etapas se somete a las muestras a un ataque químico para revelar el grano de los aceros, utilizando una disolución de 4% de ácido nítrico en etanol en volumen. Las muestras han permanecido inmersas en la disolución durante 50 segundos, tras los cuales se han lavado con agua destilada y secado mediante aire caliente (Bjerregaard et al. 1996, Metalog Guide, Struers).

Para realizar las medidas y clasificación de las distintas muestras se han empleado micrografías realizadas con un microscopio metalográfico *Nikon, modelo EPIPHOT 200*, provisto de una videocámara *Kappa* para la obtención de las micrografías. La técnica de análisis de imagen usada permite digitalizar la superficie observada con el microscopio y exportar la imagen a un ordenador, para un posterior análisis. El software empleado ha sido el *Kappa Image* y el *Perfect Image* así como el programa *Grani* para la determinación del tamaño del grano.

Ensayo de corrosión

Para evaluar la susceptibilidad al ataque corrosivo del acero deformado, se han sometido distintas probetas al ensayo de corrosión acelerada con cámara de niebla salina siguiendo la norma ASTM B-117. La cámara utilizada es de DyCometal SSC-140 y el ensayo ha durado 100 h con niebla de NaCl al 5% y temperatura de 35°C. La velocidad de corrosión se ha calculado por diferencia de pesada antes y después del ensayo.

RESULTADOS

Una vez realizados todos los ensayos de deformación se procede a la obtención de los resultados, tanto numéricos como gráficos. En primer lugar, se presentan los resultados relacionados con las deformaciones provocadas en los ensayos de tracción, destacando las estricciones de las diferentes probetas. En la **Figura 1** se muestran las gráficas obtenidas en los ensayos de tracción.

En la **Tabla 3**, se recogen las dimensiones de las probetas, tanto iniciales como finales tras los ensayos, así como los resultados obtenidos de estricción, tensión y fuerza máxima.

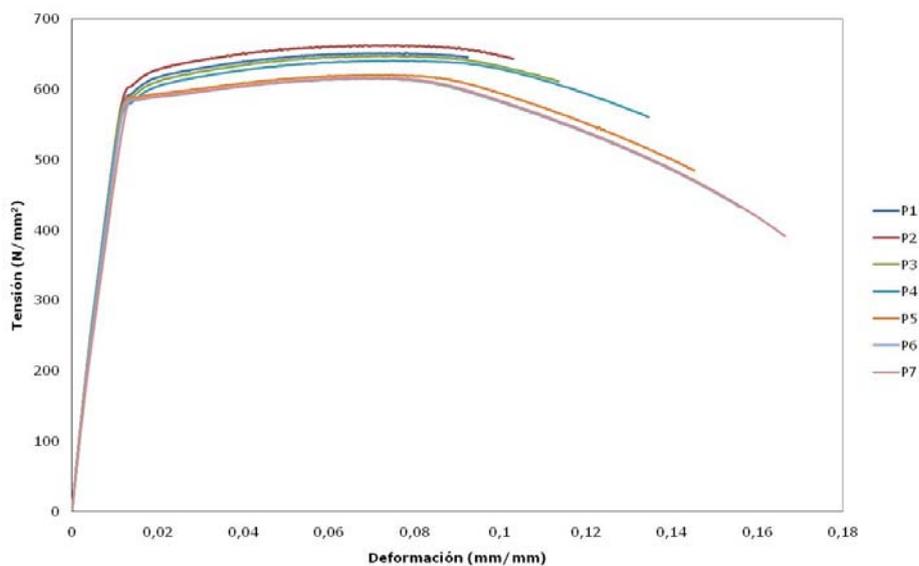


Figura 1. Curvas de tracción de las diferentes muestras ensayadas.

Tabla 3. Resultados obtenidos en los ensayos de tracción.

Probeta	d_0 (mm)	S_0 (mm ²)	d_f (mm)	S_f (mm ²)	Ψ (%)	σ_{max} (N/mm ²)	F_{max} (kN)
P1	9,84	76,04	9,46	70,28	7,57	670,19	50,96
P2	10,00	78,5	9,39	69,25	11,83	662,82	52,06
P3	9,80	75,43	8,85	61,51	18,45	647,42	48,83
P4	9,93	77,44	8,28	53,84	30,47	641,17	49,65
P5	10,00	78,54	7,34	42,31	46,12	620,36	48,70
P6	10,01	78,70	7,08	39,39	49,97	615,71	48,45
P7	10,10	80,12	6,62	34,42	57,04	616,35	49,38

En la **Tabla 4**, se recogen los alargamientos (ΔL) producidos en cada una de las probetas al final de cada ensayo, junto con la deformación conseguida (ϵ).

Tabla 4. Alargamientos en las diferentes muestras.

Probeta	ΔL (mm)	ϵ (%)
P1	4,63	7,70
P2	5,16	8,60
P3	5,69	9,48
P4	6,75	11,25
P5	7,28	12,13
P6	7,81	13,01
P7	8,34	13,90

Seguidamente, se realiza el análisis de las micrografías, obteniendo de éstas el tamaño del grano de cada muestra analizada.

Para estudiar la influencia que ejerce la deformación en el tamaño de grano de las distintas muestras de acero, es necesario determinar la superficie media de grano (S_{mg}), y para ello se utiliza un método gráfico a partir de las micrografías obtenidas siguiendo la norma ASTM E112. En primer lugar, se traza un círculo de diámetro conocido (D) sobre la micrografía y se contabilizan el número de granos contenidos en el mismo (n) así como el número de granos cortados (p), tal y como se muestra, a modo de ejemplo, en la Figura 3 para probetas con distinto grado de deformación.

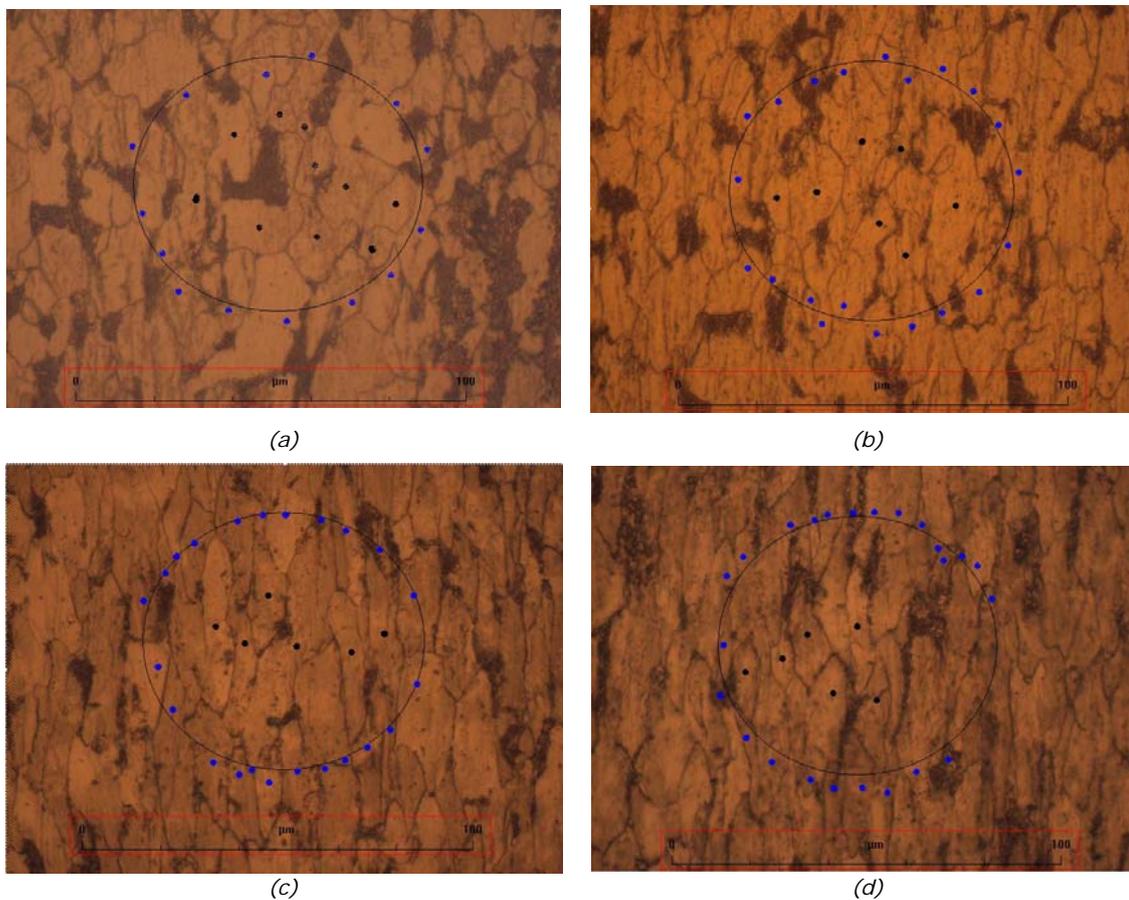


Figura 3. Micrografías (1000X) empleadas para el cálculo del índice ASTM de las muestras ensayadas: Muestra (a) P1; (b) P3; (c) P5 y (d) P7.

La expresión (1), permite obtener la superficie media de grano en mm^2/grano

$$S_{mg} = \frac{\frac{nD^2}{4}}{(n + 0.67p)N^2} \left(\frac{\text{mm}^2}{\text{grano}} \right) \quad (1)$$

siendo:

n , número de granos enteros presentes en el interior del círculo

p , número de granos parcialmente contenidos en el interior del círculo

N , aumentos en el microscopio, en este caso 1000.

En la **Tabla 5**, se muestran los valores obtenidos de superficie media de grano para las probetas deformadas a distintos porcentajes. En ella se aprecia que a medida que aumenta la deformación, la estricción aumenta de forma considerable, mientras que la superficie media de grano disminuye ligeramente.

Tabla 5. Resultados obtenidos de la superficie media de grano mediante las micrografías.

Probeta	ψ (%)	D (mm)	n	p	$S_{mg} \cdot 10^4$ (mm ² /grano)
P1	7,576	116,1	10	15	5,28
P2	11,828	116,1	8	20	4,95
P3	18,448	116,1	7	21	5,02
P4	32,800	116,1	9	17	5,19
P5	46,124	116,1	6	23	4,94
P6	49,974	116,1	5	26	4,72
P7	57,039	116,1	6	24	4,79

En la **Figura 4**, se muestra la evolución de la superficie media de grano con la estricción. Durante la deformación en frío hay una clara tendencia de los granos a colocarse en una dirección de preferencia, como es la dirección longitudinal en la cual se ha producido el alargamiento. También se puede decir que los granos reducen su dimensión en la dirección perpendicular a la del alargamiento. La tendencia anteriormente comentada ya se podía observar en las micrografías de la Figura 3 ya que los granos se van alargando en la dirección de la fuerza aplicada (Dionicio et al. 2001, *Rev. Inst. Investig. Fac. Minas Metal Cienc. Geogr*, 4 (7): 18-23).

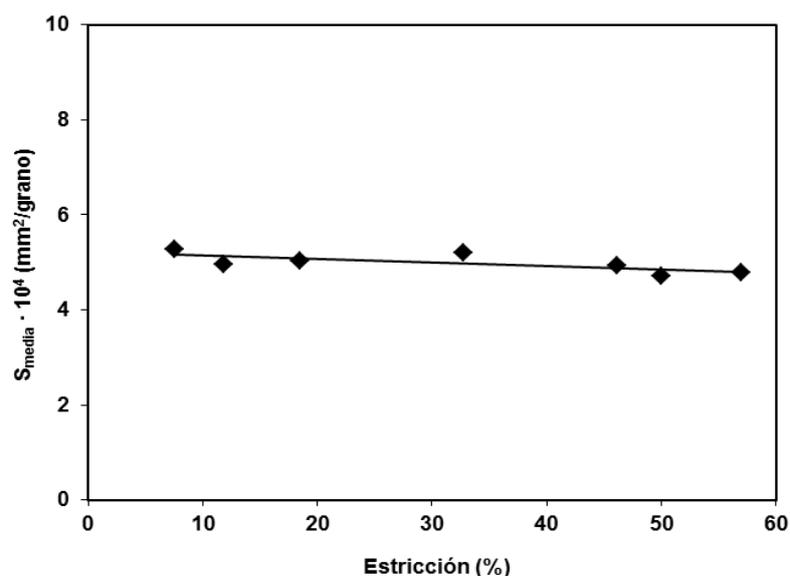


Figura 4. Evolución de la superficie media de grano.

Para compararlo con la norma ASTM, se ha calculado el número de granos que habría por pulgada cuadrada con un aumento de 100X aplicando la siguiente expresión

$$B \left(\frac{gr}{in^2} \right) = \frac{1}{S_{m,g}} \cdot \left(\frac{25,4 \text{ (m)}}{1000} \right)^2 \quad (2)$$

Para el cálculo de índice ASTM se emplean las siguientes ecuaciones, sabiendo que

$$B = 2^{ASTM-1} \quad (3)$$

siendo ASTM el índice ASTM de la muestra.

Despejando se obtiene el valor del índice buscado

$$ASTM = \frac{\text{Log} B}{\text{Log} 2} + 1 \quad (4)$$

En la **Tabla 6**, se recogen los resultados obtenidos de las micrografías y el índice de grano calculado

Tabla 6. Resultados obtenidos mediante las micrografías.

Probeta	Ψ (%)	B (granos/pulgada ²)	ASTM
P1	7,576	122,19	7,93
P2	11,828	130,42	8,03
P3	18,448	128,41	8,00
P4	32,800	124,26	7,96
P5	46,124	130,48	8,03
P6	49,974	136,63	8,09
P7	57,039	134,56	8,07

En la **Figura 5**, se muestra la evolución del tamaño grano con la deformación en frío y se aprecia que se mantiene constante, si bien en algún caso existe un ligero aumento lo cual repercutiría en un empeoramiento en las propiedades mecánicas del material.

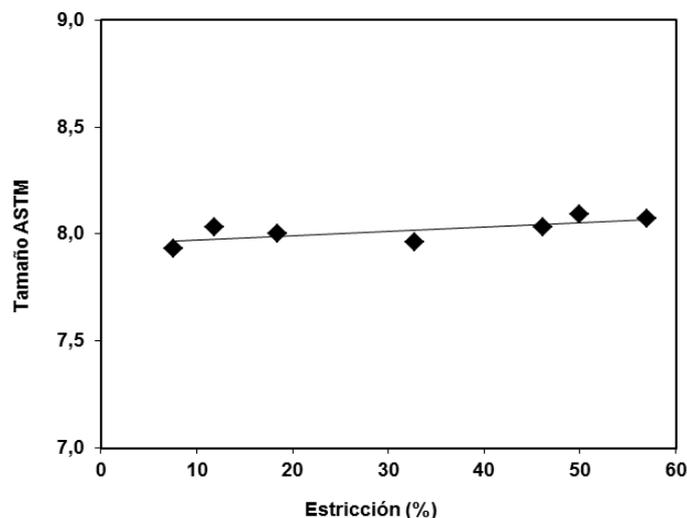


Figura 5. Evolución del índice ASTM.

Finalmente se recogen en la **Tabla 7**, los resultados obtenidos tras el ensayo de corrosión.

Tabla 7. Resultados obtenidos en los ensayos de corrosión.

Probeta	Ψ (%)	Pérdida de masa (%)
P1	7,576	0,281
P2	11,828	0,324
P3	18,448	0,293
P4	32,800	0,321
P5	46,124	0,403
P6	49,974	0,264
P7	57,039	0,312

Se aprecia que, a medida que aumenta la deformación se produce un ligero aumento de la susceptibilidad del acero a la corrosión, manifestándose en una mayor pérdida de masa, sin embargo a partir del 49% de estricción hay una disminución dicha pérdida de masa. Una observación de las probetas al microscopio muestra un ataque más agresivo y localizado en éstas últimas que en las anteriores pudiéndose tratar de corrosión por picadura que se caracteriza por una menor pérdida de peso, pero un efecto más dañino al avanzar hacia el interior del material llegando a perforarlo (Esmail et al. 2010, J. Mater. Sci. Technol., 26: 833-838).

En la **Figura 6**, se muestran imágenes de las probetas sometidas a mayor deformación y tras los ensayos de corrosión, donde se aprecian la corrosión por picadura.

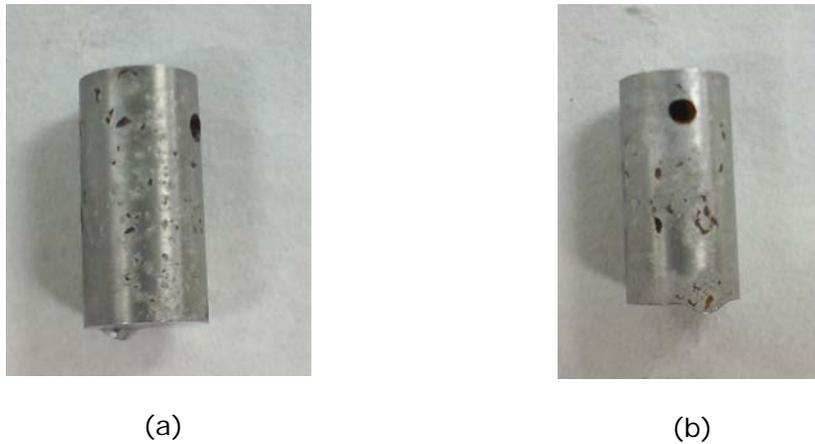


Figura 6. Muestras tras los ensayos de corrosión. (a) P6 (b) P7.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha podido constatar que durante la deformación en frío de un material hay una clara tendencia de los granos a colocarse en una dirección de preferencia, como es la dirección longitudinal en la cual se ha producido el alargamiento. Del mismo modo, se ha observado que los granos reducen su dimensión en la dirección perpendicular a la del alargamiento. Esto hace que se produzcan ligeras variaciones en la superficie media de grano que prácticamente se mantiene constante. Esta constancia en el tamaño del grano es explicable, pues durante la deformación en frío no hay ningún mecanismo de crecimiento de grano como podría ocurrir durante la deformación en caliente.

En relación a la susceptibilidad del acero al ataque corrosivo, se ha observado que la deformación en frío disminuye la resistencia del acero apareciendo, a mayores deformaciones, corrosión por picadura siendo esta forma de corrosión una de las más agresivas.

NOMENCLATURA

d_0 , diámetro inicial de la probeta (mm)

S_0 , sección inicial de la probeta (mm²)

d_f , diámetro final de la probeta después del ensayo (mm)

S_f , sección final de la probeta después del ensayo (mm²)

ψ , estricción de la probeta (%) dada por la siguiente expresión:

$$\psi = \frac{-(S_f - S_0)}{S_0} \cdot 100$$

Δl , variación de longitud (mm)

σ_{MAX} , tensión máxima durante la realización del ensayo (N/mm²)

F_{MAX} , fuerza máxima durante la realización del ensayo (N)