CAPÍTULO 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos en este estudio. Primero se muestran los resultados de las propiedades mecánicas obtenidas mediante los ensayos de tensión y se hace un análisis comparativo entre las muestras ensayadas en las diferentes condiciones. A continuación se reportan los datos arrojados por el análisis de los valores de R, $\bar{R}$ y ΔR para cada muestra. Para concluir se incluye el análisis de la microestructura de los aceros donde se reporta el tamaño de grano y se calcula el esfuerzo de cedencia, de acuerdo con la ecuación propuesta por Pickering [1-2] que lo relaciona con la composición química y con el tamaño de grano.

6.1 Resultados de los ensayos mecánicos

Los ensayos mecánicos realizados permitieron obtener las curvas de fluencia de los materiales estudiados. La figura 6.1 muestra tres curvas esfuerzo deformación para el caso del material A1, ensayada en la dirección de laminación. Las curvas correspondientes a los demás ensayos se muestran en el apéndice A. De esta figura se puede observar que las gráficas de los tres ensayos presentan características muy similares, puesto que las condiciones de los ensayos fueron las mismas.

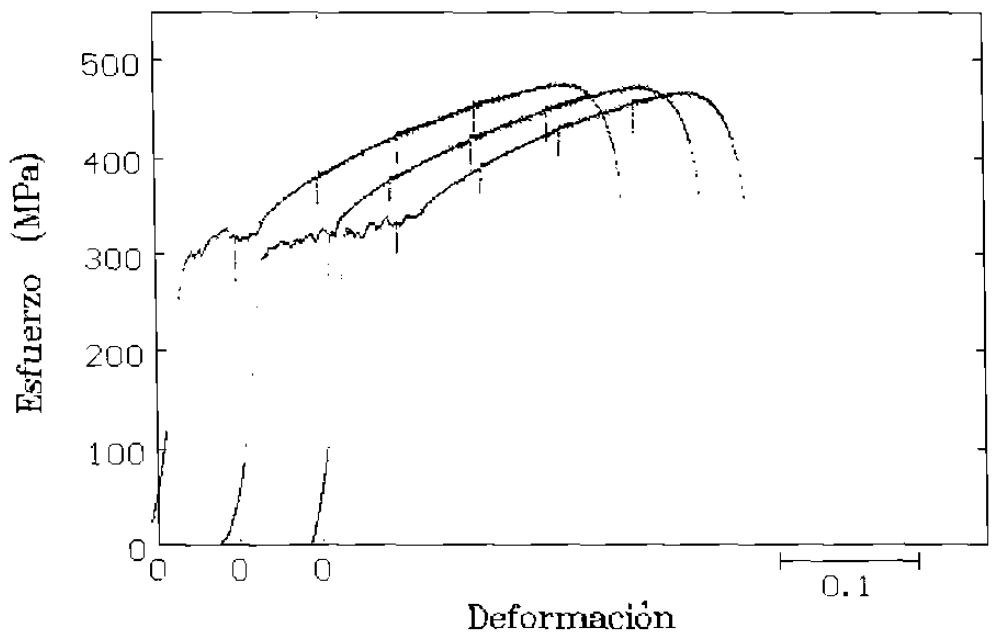


Fig. 6.1. Curvas esfuerzo deformación de los tres ensayos realizados para la muestra A1 siguiendo la dirección longitudinal.

Si se considera que el acero en el régimen plástico, se deforma de acuerdo con la ecuación propuesta por Lüdwik (4.3), entonces:

$$\sigma = k\varepsilon^{n} \tag{6.1}$$

$$log\sigma = nlog\varepsilon + logk \tag{6.2}$$

Por lo tanto, los valores de n y k pueden obtenerse a partir de la línea utilizando la forma logarítmica que se asemeja a una recta (ecuación 6.2) obtenida al graficar logσ-

logε para una curva de fluencia. La pendiente de la recta corresponde al coeficiente *n* y la ordenada al origen al logaritmo de la constante k. Las gráficas logσ-logε obtenidas a partir de las curvas de flujo experimentales (Fig. A.1- A.24) exhibieron tres zonas con diferentes valores de la pendiente, como se muestra en la Fig. 5.3. La zona de deformación elástica, la cual está indicada con el número 1, la zona de deformación plástica inhomogénea (Lüders) indicado con el número 2, y la zona de deformación plástica homogénea delimitada con el número 3. Los parámetros n y k se calcularon a partir de la pendiente y la ordenada al origen de la zona de deformación plástica homogénea. Los valores de n y k, así como los promedios de los valores σ_0 y σ_{max} de cada de los ensayos realizados se reportan en la Tabla B.1 del Apéndice B para cada uno de los materiales investigados en las tres direcciones de ensayo. Notar que $\sigma_a \equiv \sigma_0$ y $\sigma_c \equiv \sigma_{max}$.

En la figura 6.2 se muestra la variación de σ_{max} con respecto a la deformación uniforme a la dirección del ensayo para los cuatro materiales investigados. Obsérvese que los puntos correspondientes a la dirección de 90° de la muestra A3 se distribuyen en una región muy diferente a las otras dos direcciones. También es notorio que la muestra B presenta los valores más altos de σ_{max} a menores valores de deformación uniforme.

6.2 Gráficas comparativas

Para poder establecer claramente las diferencias entre los comportamientos de flujo en función de la dirección del ensayo en los diferentes materiales, se construyeron las siguientes gráficas comparativas.

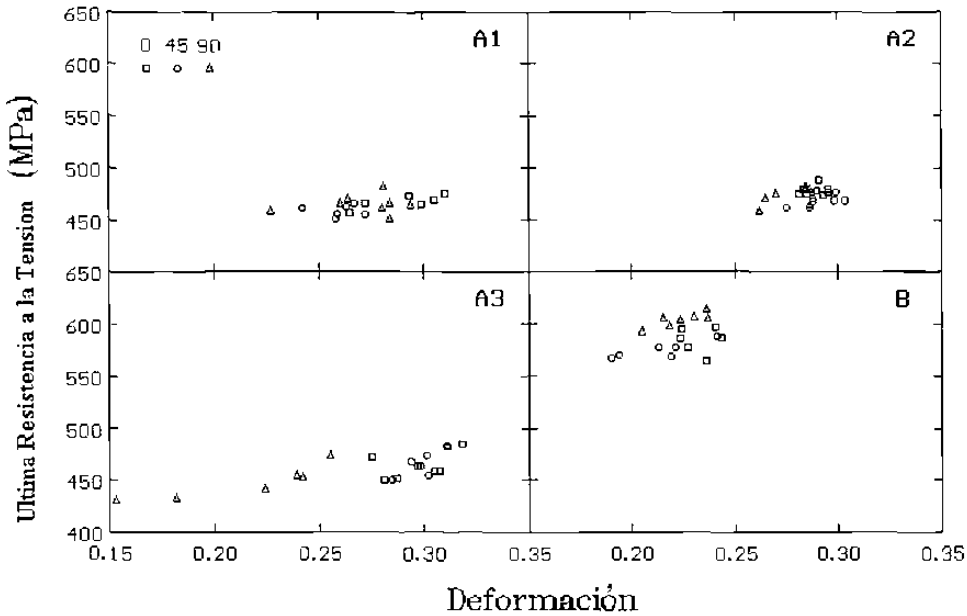


Figura 6.2 Gráfica esfuerzo deformación donde se observan los puntos σ_m.

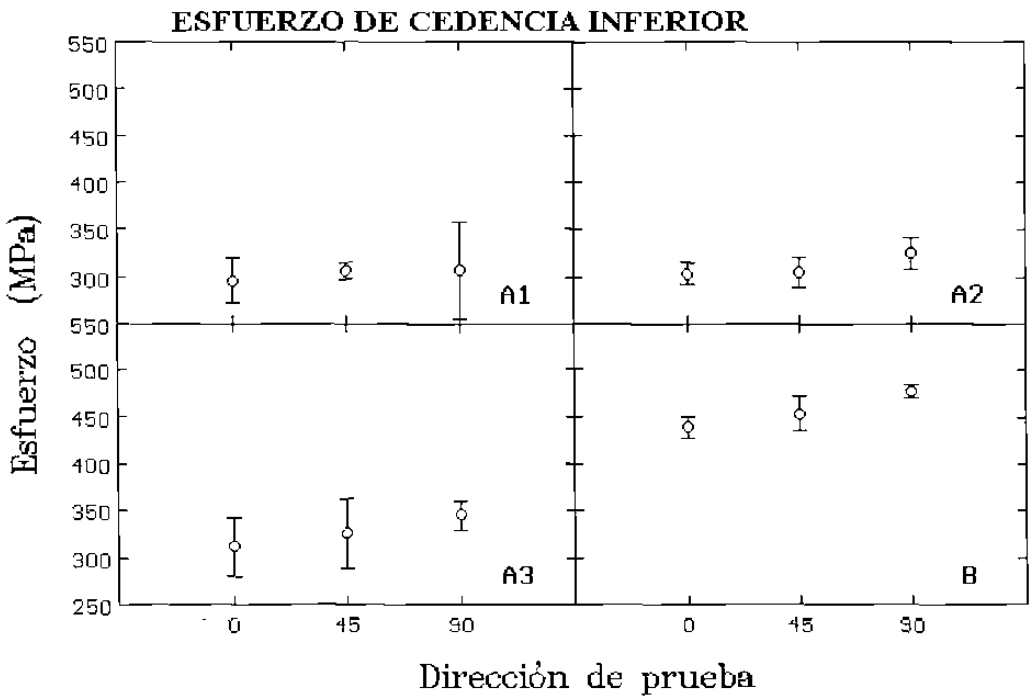


Figura 6.3 Gráfica comparativa del esfuerzo al límite de cedencia inferior, (σ_0) de las diferentes muestras ensayadas.

En la figura 6.3 se presenta los promedios y la dispersión con un 95% de certidumbre de los datos obtenidos para el esfuerzo de cedencia inferior (σ_L). En las muestras A1 y A2 se observa que σ_l no depende de la dirección de ensayo. En contraste, las muestras A3 y B se observa que la dirección a 45° exhiben un ligero incremento en σ_l cuando la dirección del ensayo de tensión es rotada de la dirección de laminación hacia la dirección transversal de la lámina.

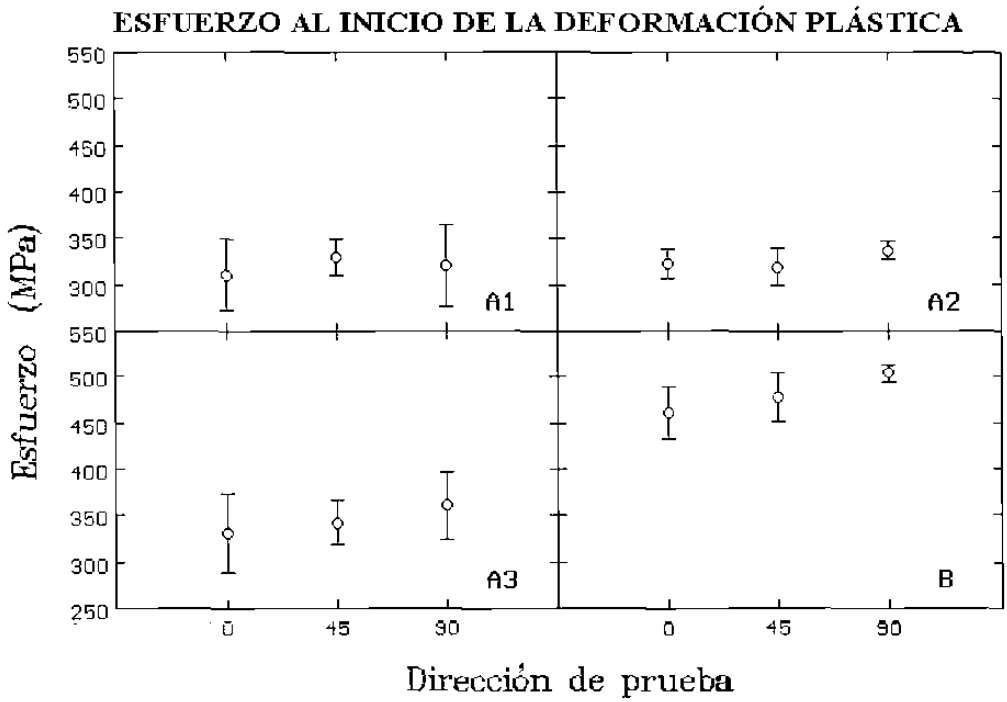


Figura 6.4 Gráfica comparativa del valor del esfuerzo al inicio de la deformación homogénea (σ_l)de las diferentes muestras ensayadas.

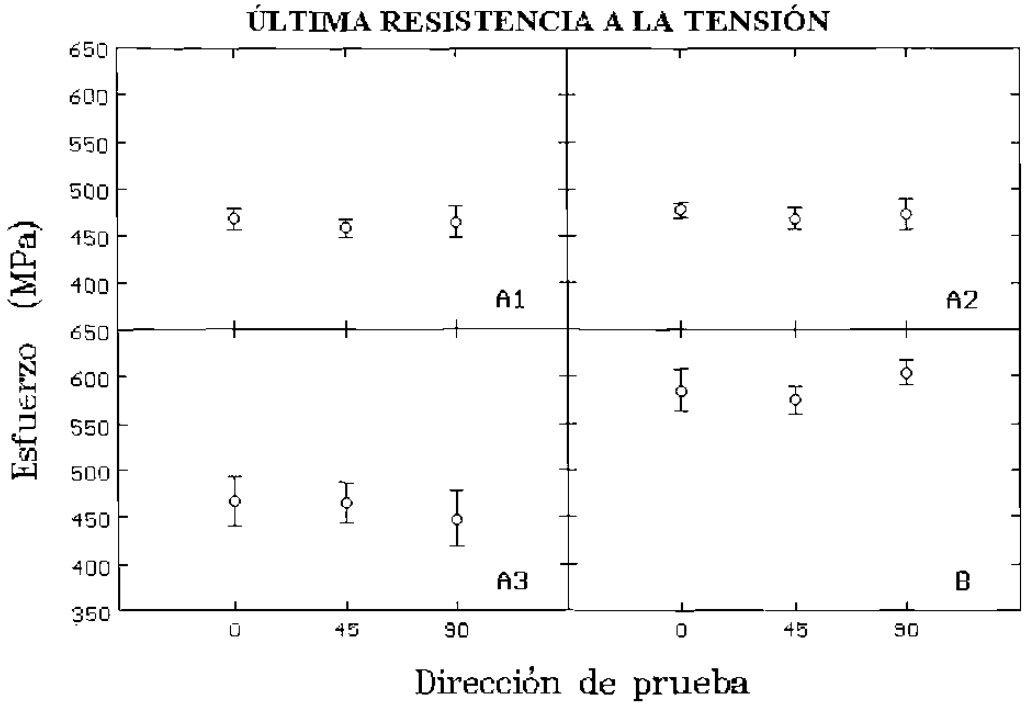


Figura 6.5 Gráfica comparativa de la última resistencia a la tensión (σ_m) de las diferentes muestras ensayadas

El esfuerzo al inicio de la deformación plástica homogénea mostró un comportamiento similar al observado en el esfuerzo de cedencia inferior, en función de la dirección de ensayo, figura 6.4.

El efecto de la dirección de ensayo sobre la última resistencia a la tensión se muestra en la figura 6.5. Como se puede apreciar, la dirección de ensayo no tiene un efecto significativo sobre σ_{max}, aunque, en el caso de la muestra B, σ_{max} es ligeramente mayor en la dirección transversal.

Estos resultados (Fig. 6.3-6.5) muestran que la dirección en la que se realiza el ensayo de tensión tiene un efecto significativo sobre el esfuerzo de cedencia inferior y sobre el esfuerzo al inicio de la deformación plástica homogénea en los aceros A3 y B. Para explicar este comportamiento es necesario considerar las condiciones del proceso, así como las características de la estructura obtenida.

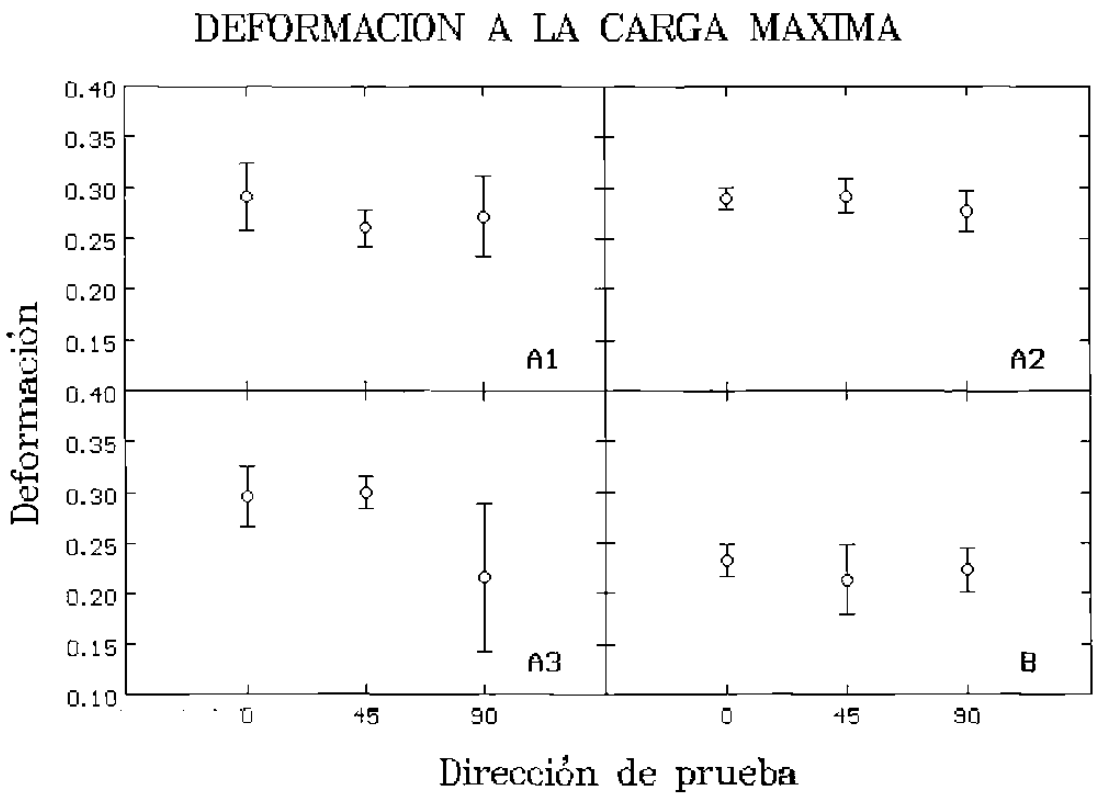


Figura 6.6 Gráfica comparativa de la deformación a la carga máxima (ε_m) de las diferentes muestras ensayadas.

El efecto de la dirección del ensayo de tensión sobre la magnitud de la deformación a la carga máxima (ε_{max}) que presentaron las muestras, figura 6.6, es casi constante en todos los casos, aunque es notable que para el caso de la muestra A3, la más delgada, la deformación es mucho menor en la dirección transversal. En el caso de la muestra B, la variación es menor, incluso en el valor para las direcciones a 45° y 90° son constantes.

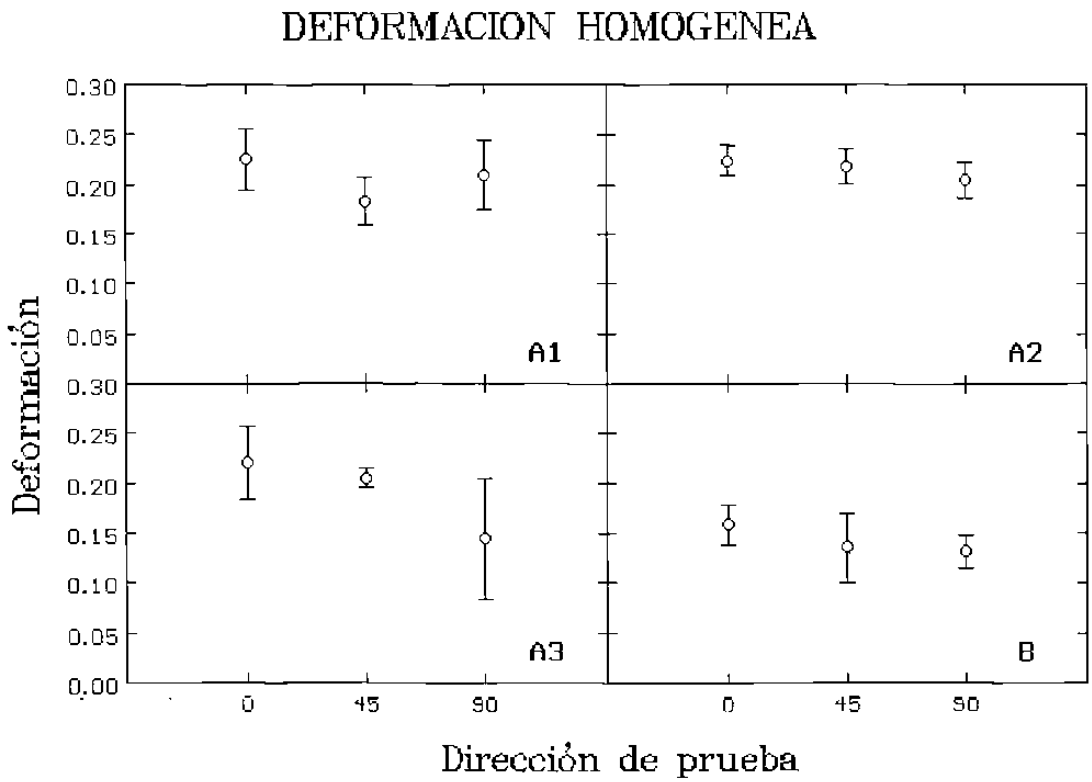


Figura 6.7 Gráfica comparativa de la zona de deformación homogénea (ε_m-ε_l) de las diferentes muestras ensayadas.

Un efecto similar se observa en la magnitud de la deformación homogénea. Como era de esperarse, en las muestras A3 y B la deformación homogénea obtenida en la dirección a 90° es menor que en las otras dos direcciones (Fig. 6.7).

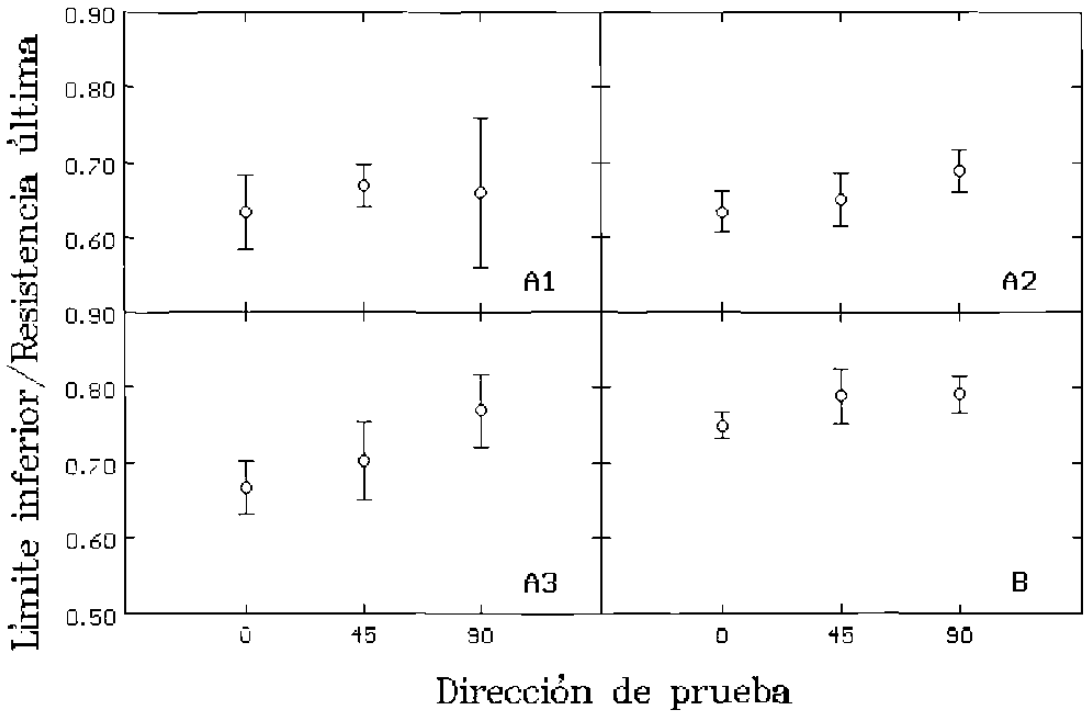


Figura 6.8 Gráfica comparativa del esfuerzo del límite elástico inferior entre la resistencia última (σ_l/σ_{max}).

En la figura 6.8 se muestra el efecto de la dirección de ensayo sobre la relación σ_l/σ_{max}, factor que ayuda a cuantificar la capacidad de deformación plástica homogénea de un material (mientras menor sea este cociente, mayor será la magnitud de la deformación homogénea que soporta un material). En notorio que en la dirección de 90° se presentan los valores más altos de σ_l/σ_{max}, con excepción de las muestras A1 y B, en las cuales el cociente σ_l/σ_{max} permanece constante. Los valores más bajos se presentan en la dirección a 0°.

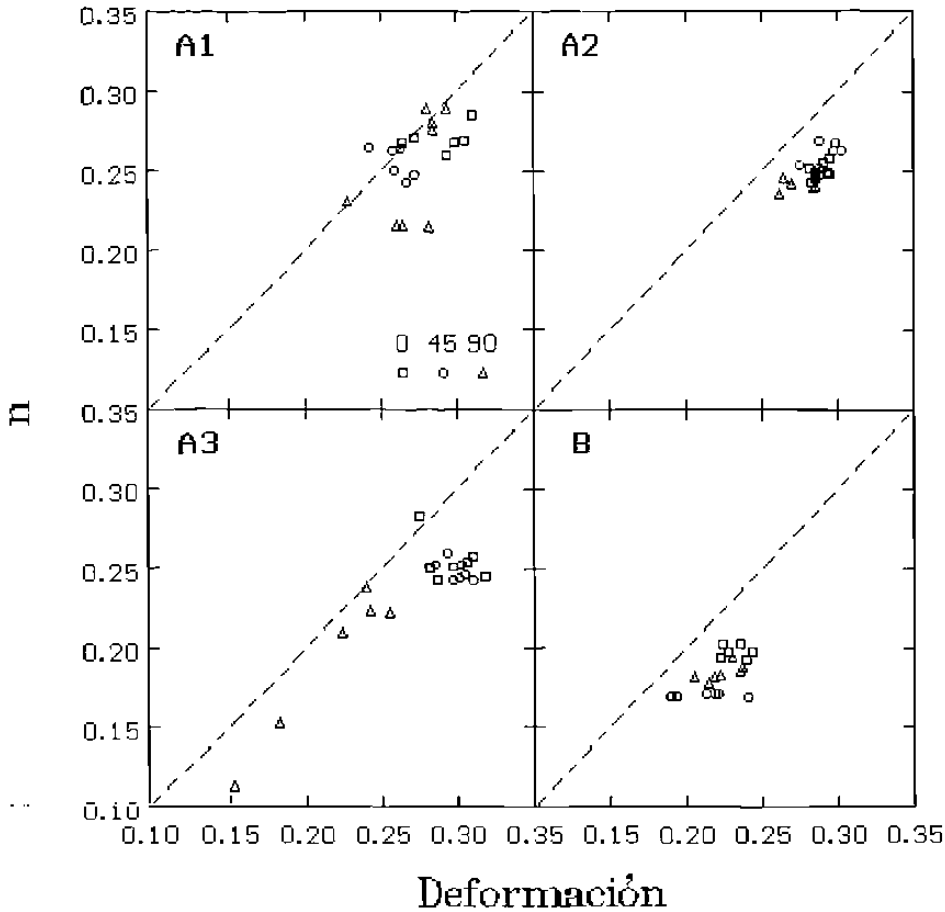


Figura 6.9 Gráfica del valor n contra la deformación máxima (ε_m)

En la sección 4.2 se hizo la demostración que la magnitud de la deformación verdadera uniforme es igual al coeficiente *n*, si el material presenta el comportamiento regido por la ecuación de Lüdwik. Por lo tanto, si se grafica *n* en función de la deformación verdadera uniforme, el resultado debe ser una línea recta a 45°. En la gráfica de la figura 6.9 se observa que la muestra A1 es la más se ajusta a tal comportamiento.

Las figuras 6.10 a 6.12 muestran la dispersión que presentan los valores de esfuerzo a carga máxima, o resistencia última, en función de la deformación a carga máxima para las muestras en las tres diferentes direcciones.

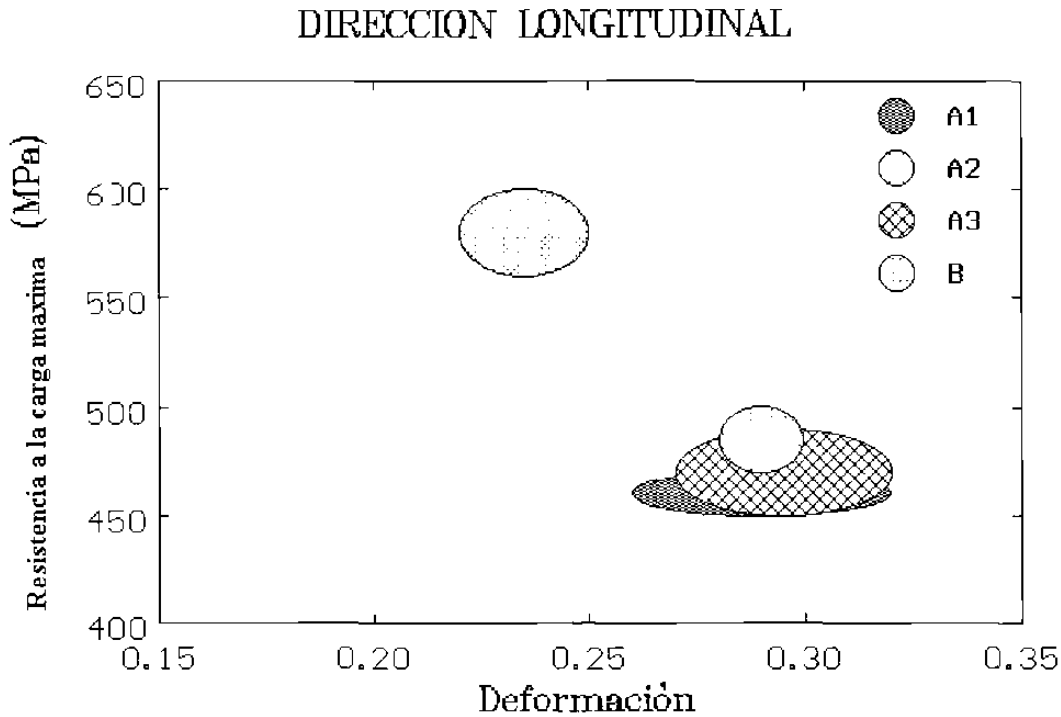


Fig. 6.10 Zonas donde caen los valores de resistencia última para todas las muestras en la dirección longitudinal.

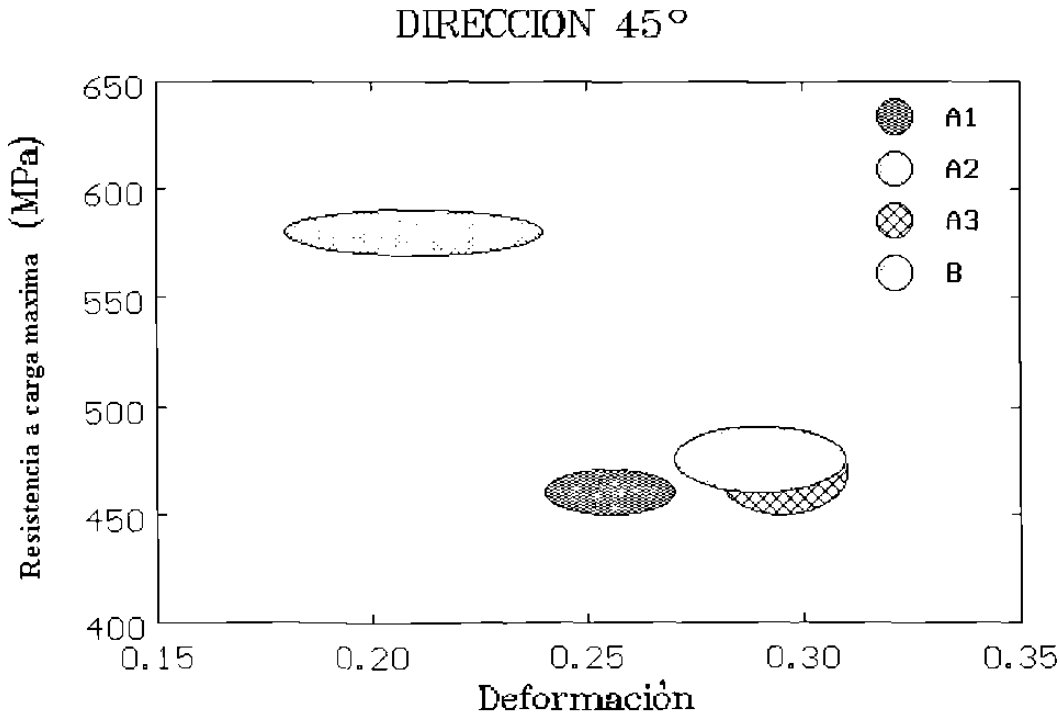


Fig. 6.11 Zonas donde caen los valores de resistencia última para todas las muestras en la dirección a 45°.

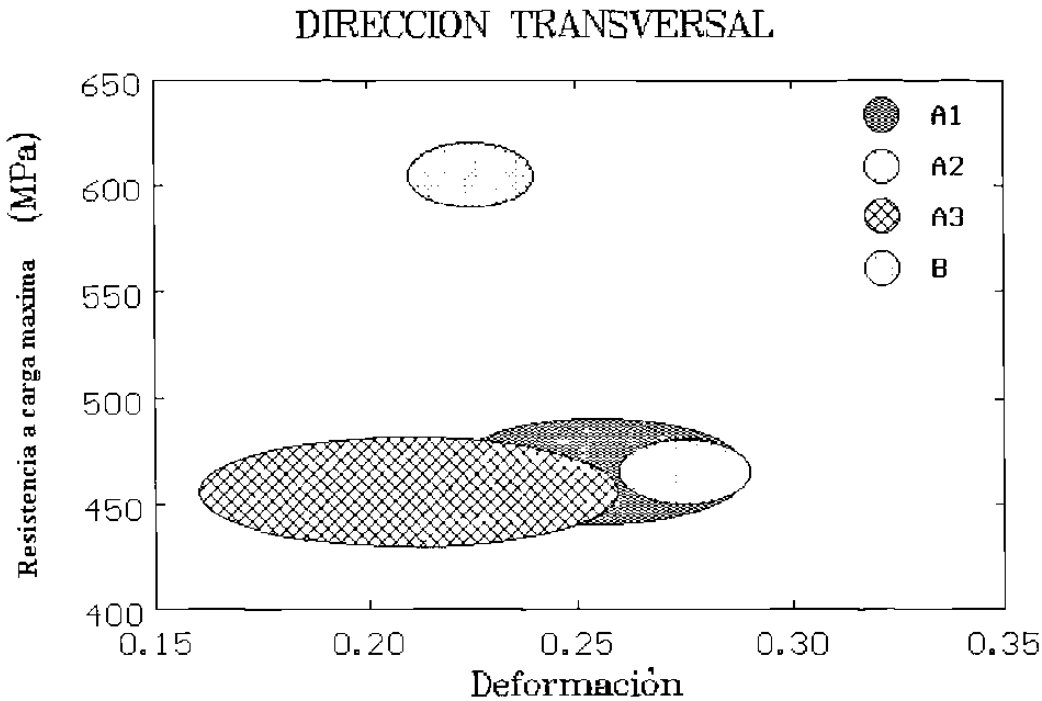


Fig. 6.12 Zonas donde caen los valores de resistencia última para todas las muestras en la dirección transversal.

Estas gráficas permiten apreciar un comportamiento similar para los tres aceros del tipo A, excepto cuando se ensaya en la dirección transversal, en la que el valor de la deformación al punto de inicio de la estricción es menor.

6.3 Resultados del análisis de R

Con las mediciones de ancho y espesor de las probetas, en cada uno de los pasos durante el ensayo de tensión se obtuvieron los valores de deformación en el ancho (ε_w) y en el espesor (ε_t), los cuales se graficaron en función al desplazamiento del cabezal de la máquina de tensión. Un ejemplo de estas gráficas se muestra en la figura 6.13 correspondiente al material A1 ensayado en la dirección de laminación. En la figura 6.14

se grafican los valores de deformación del espesor (ε_t) contra deformación del ancho (ε_w) de la muestra A2 ensayada en la dirección a 45° de la dirección de laminación. Como se puede apreciar, la deformación en el ancho es mayor que en el espesor. Este resultado indica que la resistencia en la dirección del espesor de la lámina es mayor que la resistencia en su plano y, por lo tanto, esta lámina muestra cierta anisotropía normal. Con estos valores de deformación se puede calcular el valor R

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \tag{6.2}$$

Una gráfica de R en función de ε_t permite obtener, por extrapolación, el valor de R_0, es decir, el valor R que se obtendría en una lámina libre de deformación.

Un ejemplo de este procedimiento de extrapolación para la determinación de R_0 se presenta en la figura 6.15, en la que se emplean los datos obtenidos en la muestra A3 ensayada en la dirección transversal. En esta gráfica se observa una línea punteada a la que se ajustan los puntos para poder obtener el valor de R_0 buscado.

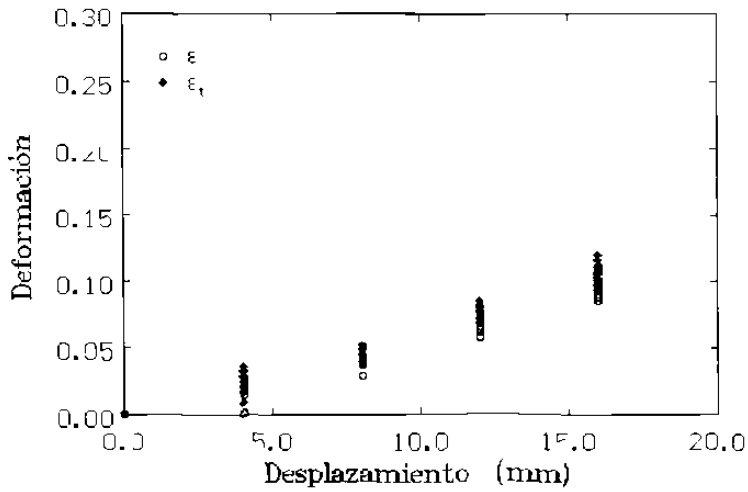


Fig. 6.13 Gráfica de las deformaciones (ε_t) y (ε_w) contra el desplazamiento.

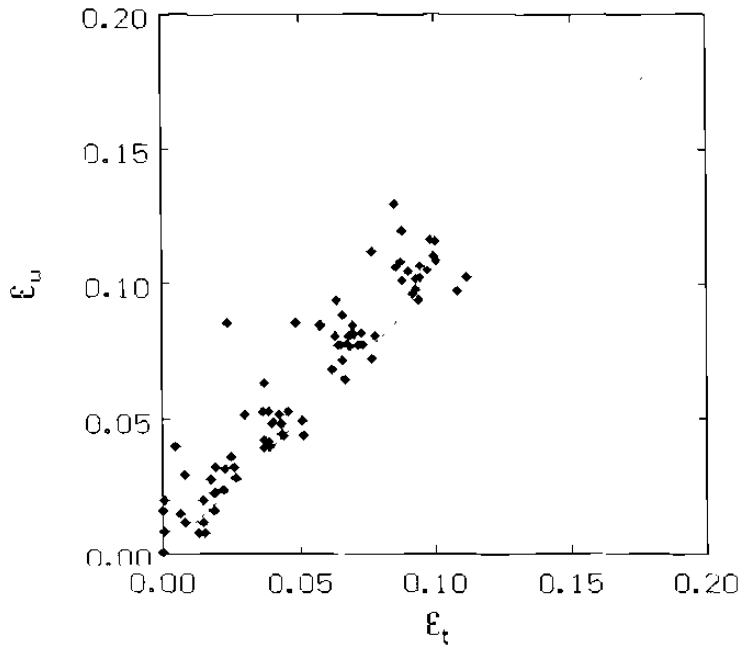


Figura 6.14 Gráfica de deformación del espesor (ε_t) contra deformación del ancho (ε_w).

Con el valor R_0 obtenido de la extrapolación se calcularon los valores de R_0 y ΔR_0 definidos por las ecuaciones:

$$R_0 = \frac{R_l + R_t + 2R_{45}}{4} \tag{6.3}$$

$$\Delta R_0 = \frac{R_l + R_t - 2R_{45}}{2} \tag{6.4}$$

Lo que define la anisotropía característica de la lámina. En la Tabla 6.1 se presentan los valores encontrados de estos parámetros para todas las muestras ensayadas. Los datos de los ensayos que se realizaron en la lámina A1 ensayada en la dirección de laminación utilizados para calcular estos valores se encuentran en la Tabla B.2 del apéndice B.

El significado físico de estos parámetros es tal que si el valor R es igual a uno el material se deforma en igual magnitud a través del ancho que a través de su espesor y un ΔR igual a cero indica que el material presenta propiedades iguales en todas direcciones [3]. Se observa que los valores de R y ΔR obtenidos son prácticamente 1 y 0 respectivamente, valores que describen a un material isotrópico. Como se vio en el capítulo 3, se puede desarrollar cierto tipo de textura típica de los metales ccc cuando la austenita recristaliza antes que transforme a ferrita, textura que no se alcanza a preciar ya que está técnica no sería la apropiada para medirla. Además, de que se ha visto [4] que en metales que fueron laminados en caliente y después laminados en frío y recocidos, llevar a cabo la laminación en caliente cerca de A_3 deteriora el valor R lo cual, se alcanzó a apreciar poco en estas muestras, aunque los valores de R más bajos se obtuvieron en las muestras laminadas más cerca de esta temperatura. En cuanto al valor ΔR se observa que fue mayor para la muestra B, la cual efectivamente presentó anisotropía, aunque se puede considerar que los valores están cercanos a cero. Sin embargo, las propiedades mecánicas obtenidas en las diferentes direcciones muestran anisotropía sobre todo en el esfuerzo de cedencia.

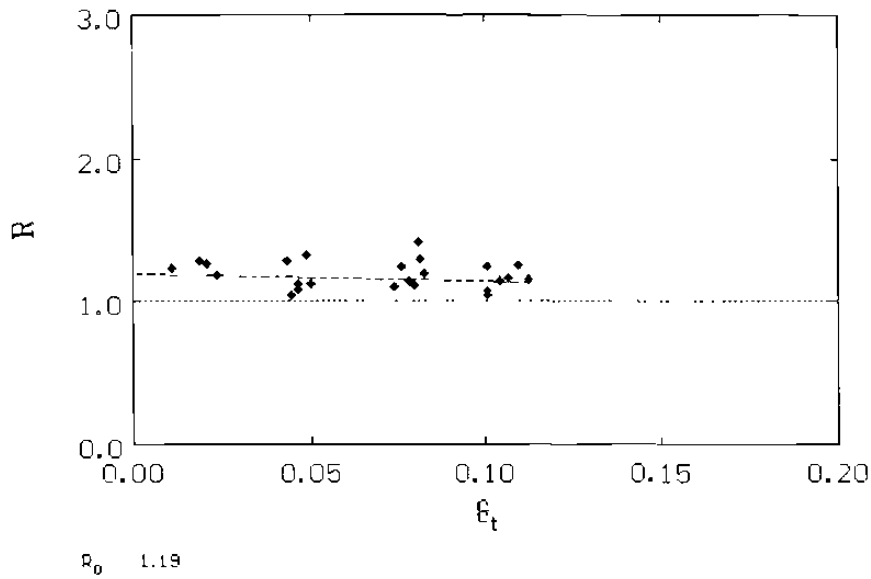


Figura 6.15 Ejemplo de una gráfica de los valores de R para la muestra A3 ensayada en la dirección transversal, donde se extrapola el valor de R_0.

Muestra	R_0	R	ΔR
A1 0°	1.19	1.205	-0.15
A1 45°	1.39		
A1 90°	0.96		
A2 0°	1.68	1.1675	0.475
A2 45°	0.93		
A2 90°	1.13		
A3 0°	1.08	0.9225	0.425
A3 45°	0.71		
A3 90°	1.19		
B 0°	1.55	0.9175	0.575
B 45°	0.71		
B 90°	1.03		

Tabla 6.1 valores obtenidos para R_0, R y ΔR.

6.4 Microestructura

Los resultados de las mediciones del tamaño de grano observado en los aceros se presentan en la Tabla 6.2, donde se incluyen los valores obtenidos de esfuerzo de cedencia calculados utilizando las expresiones (6.6) y última resistencia a la tensión (6.7) utilizando 0.006%N, respectivamente.

$$\sigma_0 (MN/m^2) = 15.4[3.5 + 2.1\%Mn + 5.4\%Si + 23/\sqrt{\%N_f} + 1.13d^{-1/2}] \quad (6.6)$$

$$\sigma (MN/m^2) = 15.4[19.1 + 1.8\%Mn + 5.4\%Si + 0.25\%perlita + 0.5d^{-1/2}] \quad (6.7)$$

donde d está dado en mm.

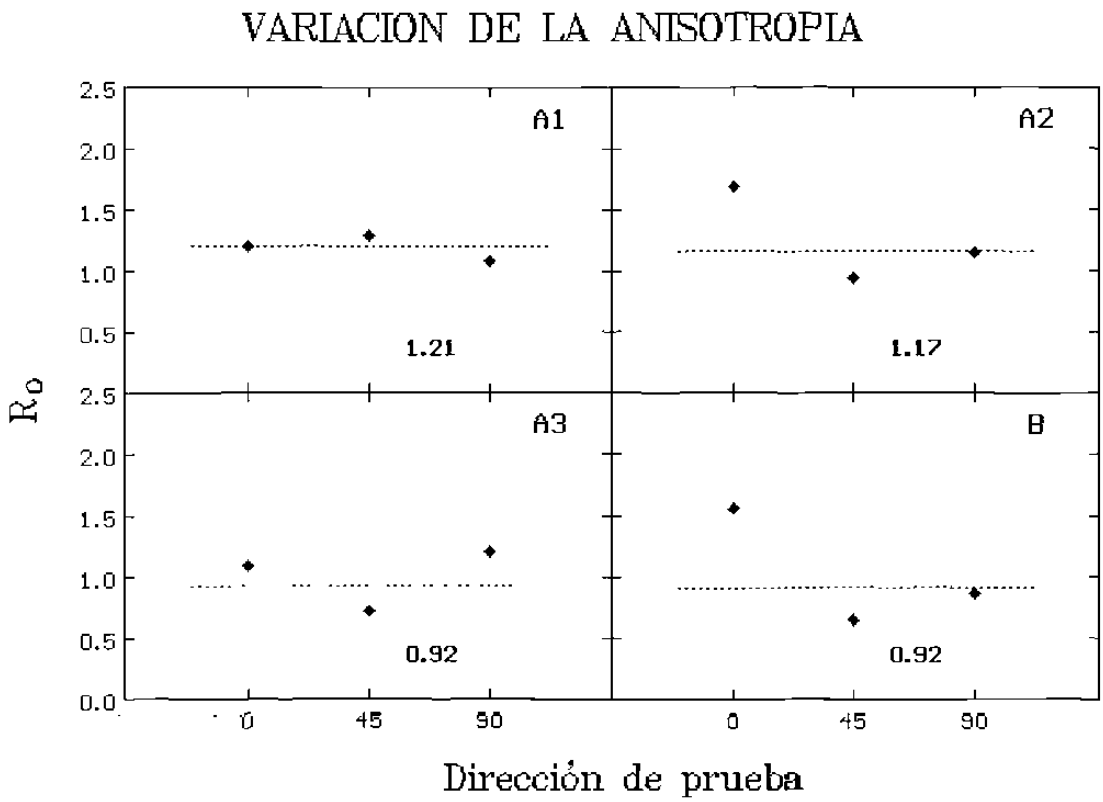


Figura 6.16 Gráfica comparativa de los valores R_0 obtenidos de la extrapolación

No. De muestra	Tamaño de grano [μm]	% Perlita	σ_0 (esp) MN/m^2	σ_0 obtenido MN/m^2	σ (esp) MN/m^2	σ obtenido MN/m^2
A1	6.72	0.011	297.06	256.31	394.88	463.91
A2	7.68	0.014	285.38	308.38	388.85	473.18
A3	6.04	0.053	312.79	321.92	399.63	459.76
B	2.97	0.029	426.20	456.58	458.49	588.31

Tabla 6.2 Tamaño de grano y esfuerzo de cedencia esperado de la ec. (6.6) y el obtenido de los ensayos.

Es notorio que los valores de esfuerzo de cedencia (σ_0) experimentales son mayores que los calculados a partir de la composición. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que esta ecuación se desarrolló en condiciones de transformación lenta (recocido y normalizado) y que en este caso se tienen aceros que fueron laminados en caliente con

diferentes velocidades de enfriamiento y diferentes variables del proceso, como la temperatura final y composición del acero, aunque estructuralmente no sean diferentes, existe cierto grado de dislocaciones remanentes de la deformación, las cuales no se alcanzan a apreciar en una micrografía.

Dentro de los aceros tipo A, el que presentó mayor diferencia entre el valor σ_0 esperado y el obtenido fue el A1 (siendo el único caso en que el obtenido fue menor al esperado) es decir el que fue laminado a un mayor espesor, por lo que se puede pensar que la velocidad de enfriamiento fue menor con respecto a los otros, además que la temperatura final fue la más alta. La diferencia mayor entre el σ obtenido y el σ esperado se presentó en el acero tipo B, el cual tiene un mayor contenido de C, Mn y Nb. El Mn tiene el efecto de que además de que proporciona mayor resistencia al acero, también reduce el intervalo de transformación austenítica por lo que es fácil pensar que en el último paso de laminación la transformación ya había concluido y hubo cierta cantidad de endurecimiento por deformación o que los granos no recristalizaron por completo, con lo que se obtiene una estructura duplex, es decir, con granos de tamaño de grano muy pequeño y otros de tamaño más grandes, característico de estructuras parcialmente recristalizadas. En general para la última resistencia a la tensión se observó que los valores obtenidos son mayores que los esperados, la diferencia entre estos valores para los aceros tipo A es casi la misma para los tres (71 MN/m^2 aproximadamente) y la mayor diferencia se presentó en el acero B (139.86 MN/m^2 aproximadamente), es decir, que adquirió mayor resistencia de lo esperado en condiciones de transformación isotérmica.

En las micrografías de los aceros empleados en este estudio se observa que los aceros del tipo A tienen una estructura muy similar que consiste en una matriz de granos ferríticos equiaxiales, el acero A2 presenta el tamaño de grano más grande de los tres y A1 el más pequeño con cierta cantidad de carburo precipitado en los límites de grano. Sin embargo, la microestructura es muy parecida y, en los cuatro aceros aparentemente, los granos están completamente recristalizados. El acero tipo B presenta una matriz de granos ferríticos con diferencias en tamaño de grano muy marcadas entre los finos y los

de mayor tamaño, lo cual, como ya se mencionó, es típico de granos que no recristalizaron completamente (como se describe en la figura 2.4 de la sección 2.3.1), o que el crecimiento de estos se está dando a expensas de los granos vecinos. Como ya se mencionó, este acero tiene un contenido de C, Mn y Nb mayor que en el resto de los aceros, por lo que la zona de transformación austenítica se pudo ver afectada por el contenido de este último elemento, lo cual se refleja en la microestructura. Esta presenta una matriz ferrítica con islas muy pequeñas de perlita, las cuales se observan en la Fig. 6.23, la cual fue obtenida con microscopía electrónica de barrido para apreciar la perlita. El resto de las micrografías, figuras de la 6.21 a la 6.24, también se obtuvieron con esta técnica, esto se hizo con el fin de encontrar precipitados y segundas fases.

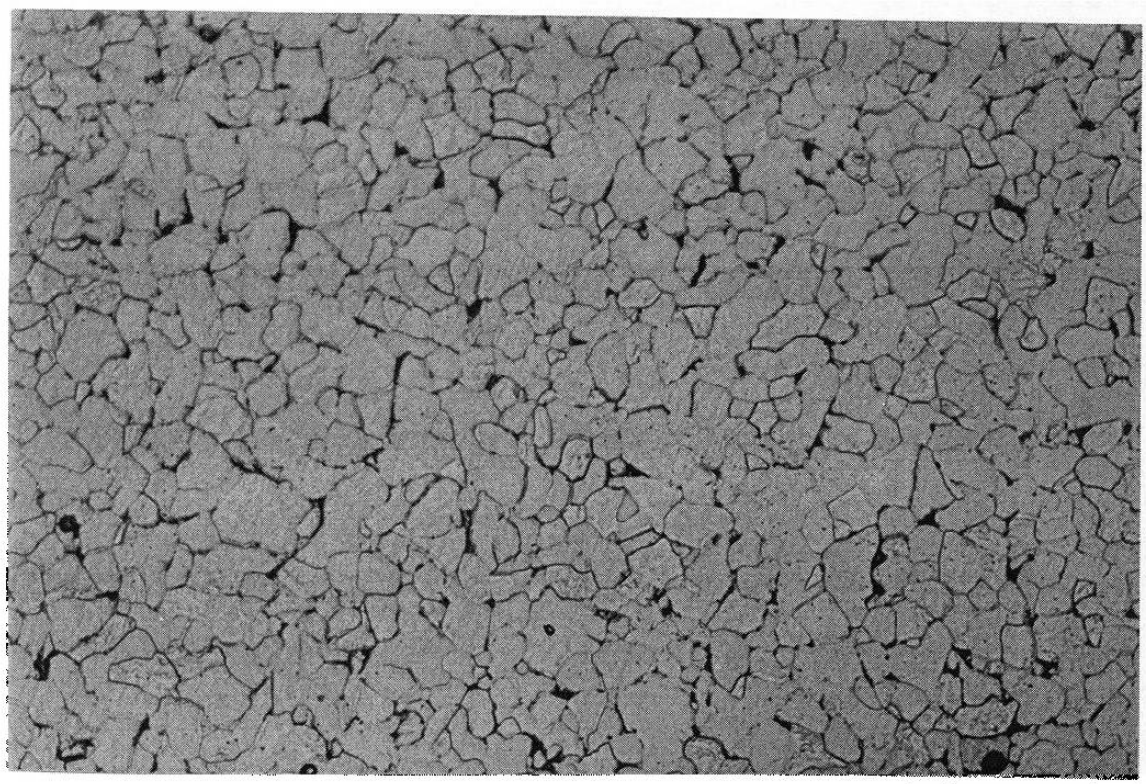
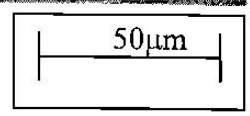


Figura 6.17 Muestra A1, acero con 0.054% de C.



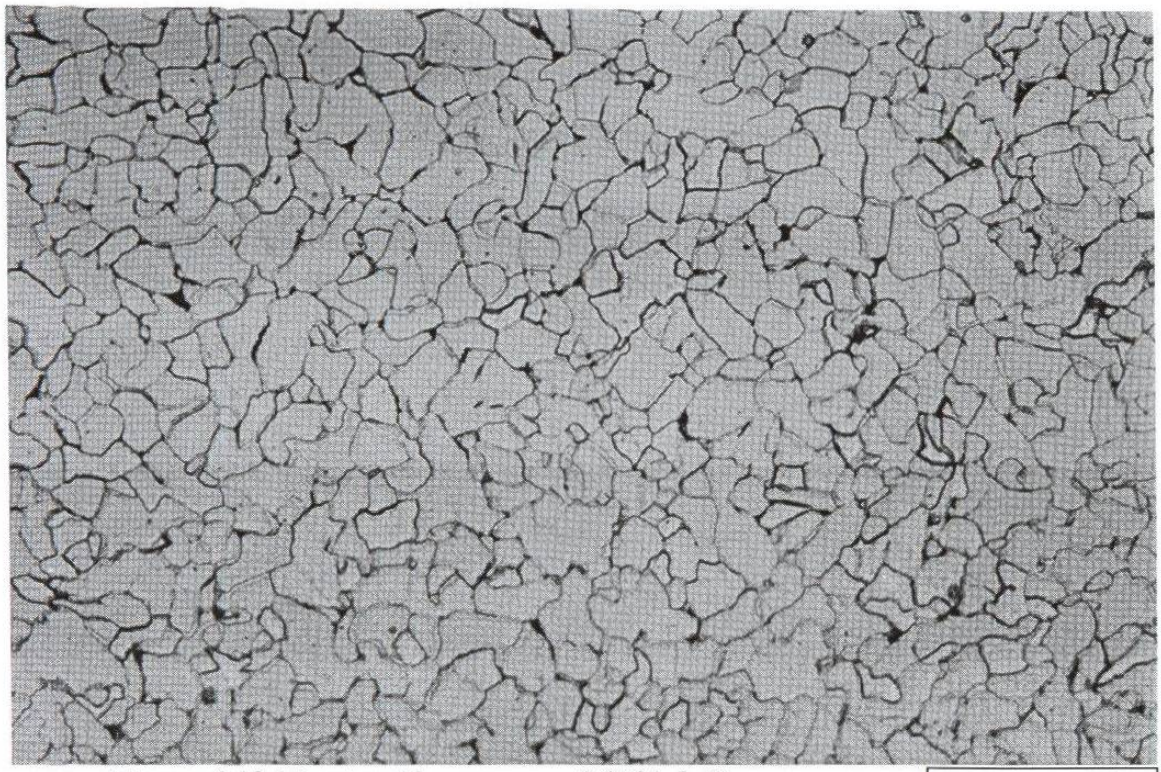
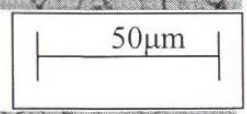


Figura 6.18 Muestra A2, acero con 0.05% de C



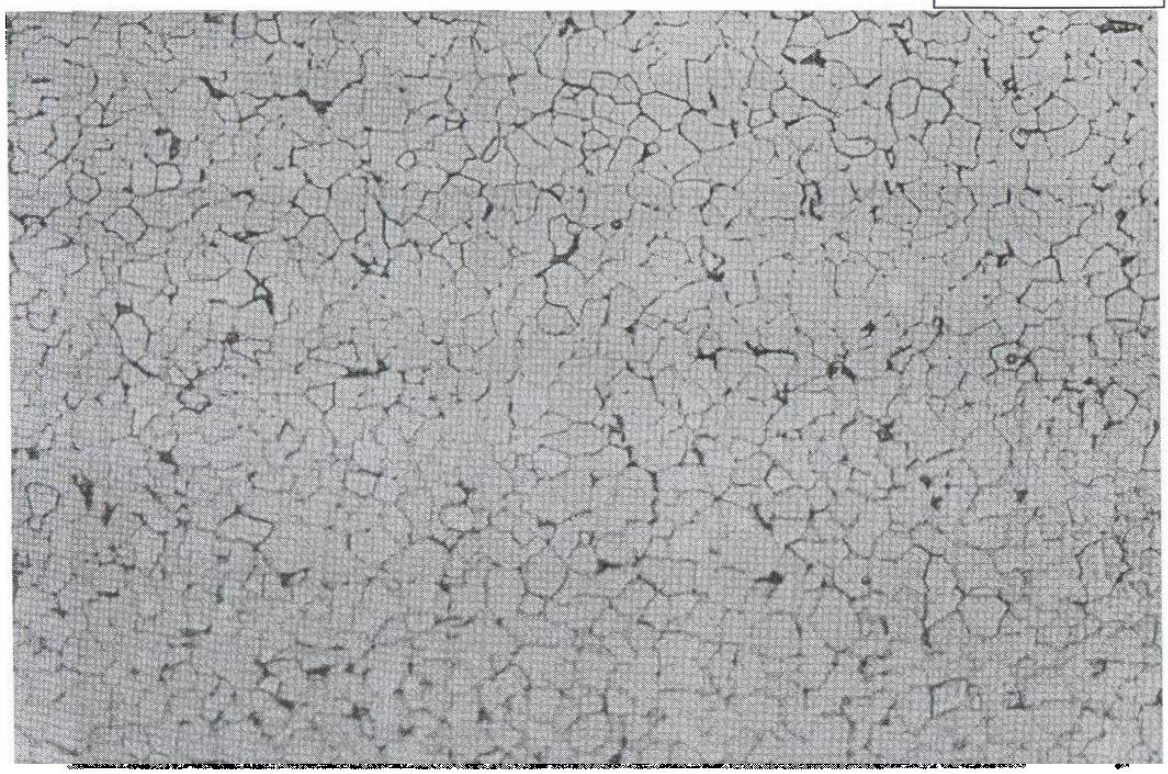


Figura 6.19 Muestra A3, acero con 0.053% de C

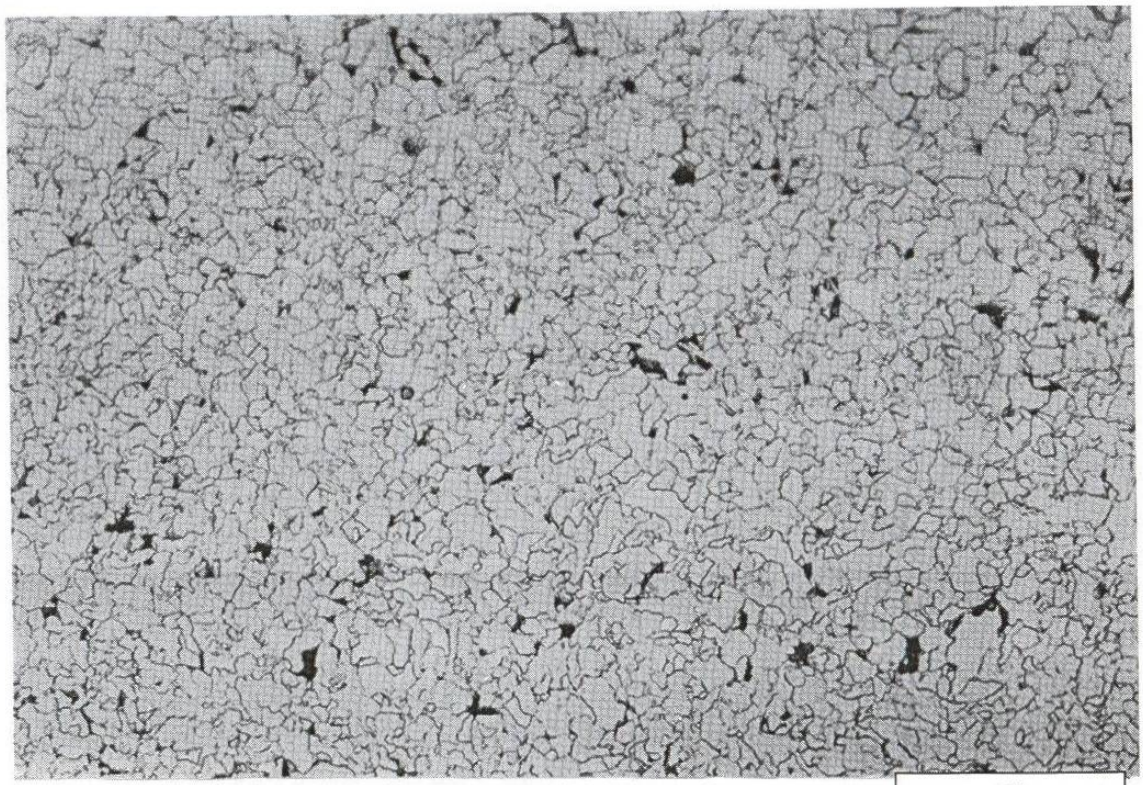


Figura 6.20 Muestra B, acero con 0.064% de C

50μm

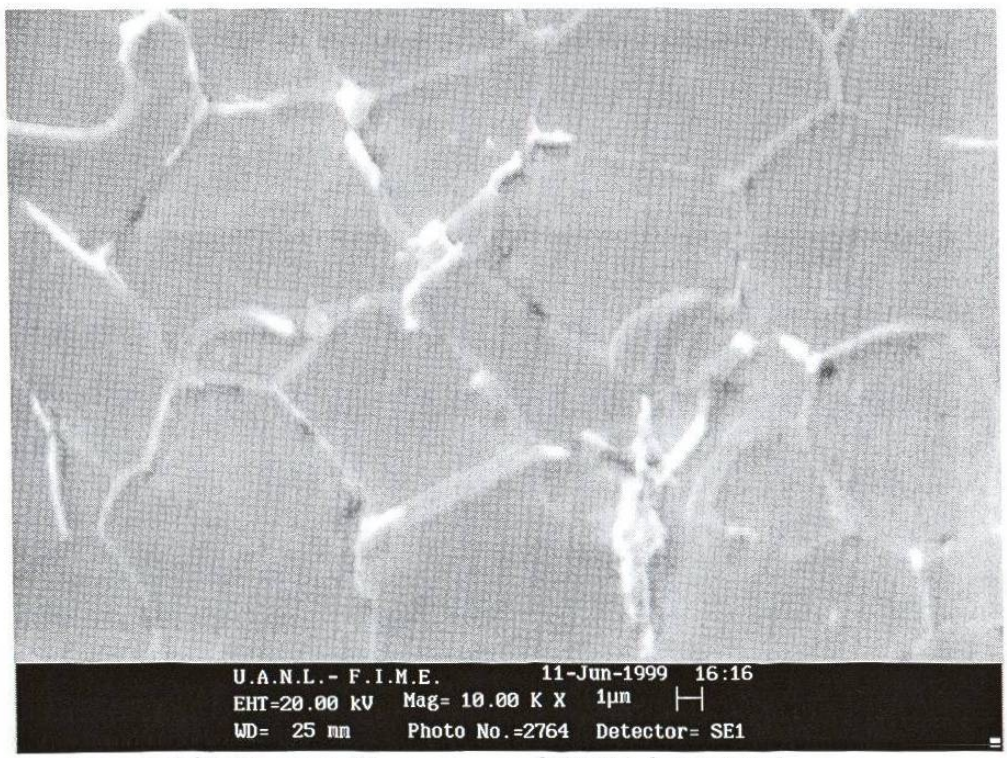


Figura 6.21 Muestra A3 , acero con 0.053% de C (SEM)

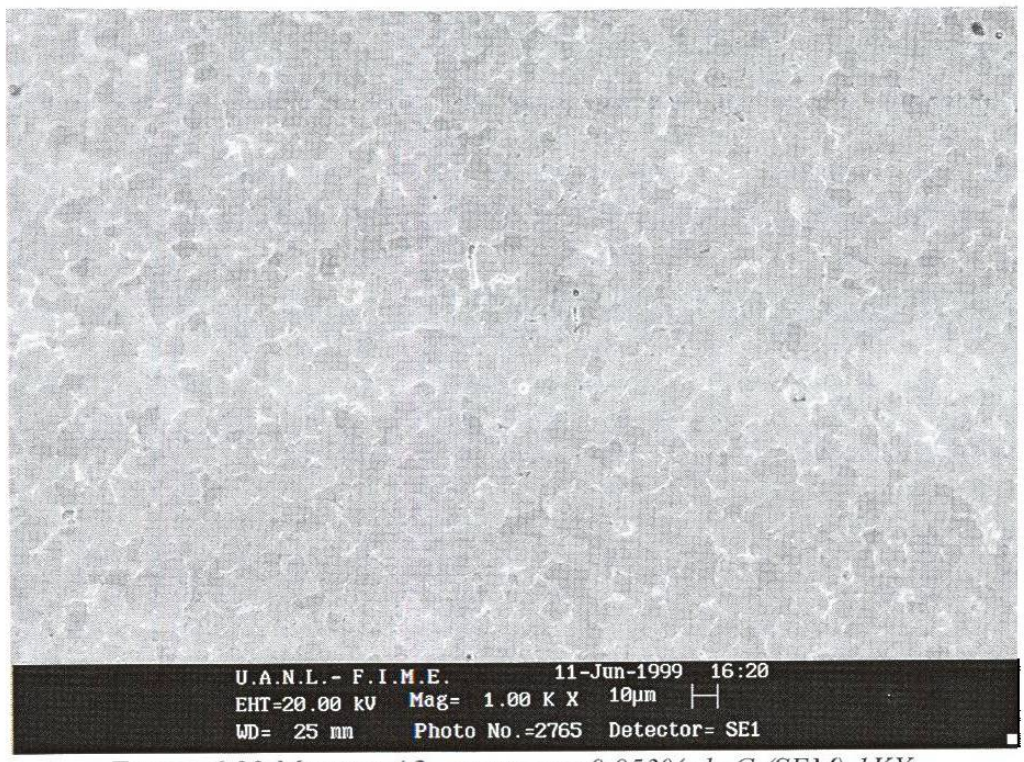


Figura 6.22 Muestra A3 , acero con 0.053% de C (SEM) 1KX

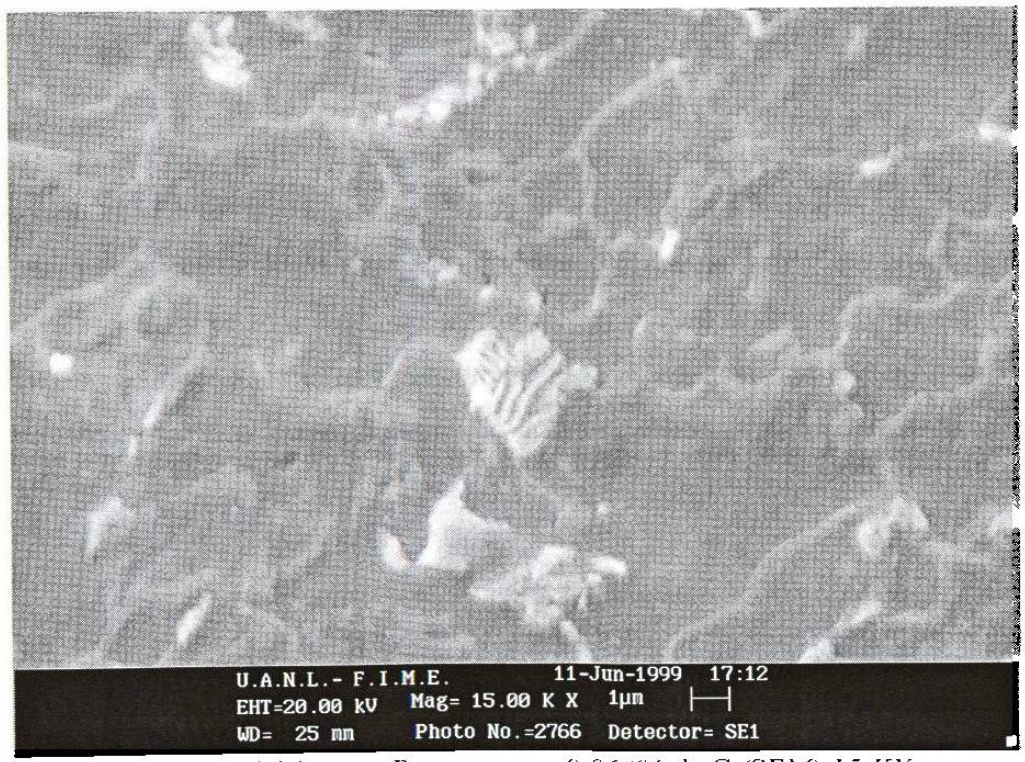


Figura 6.23 Muestra B, acero con 0.064% de C (SEM) 15 KX

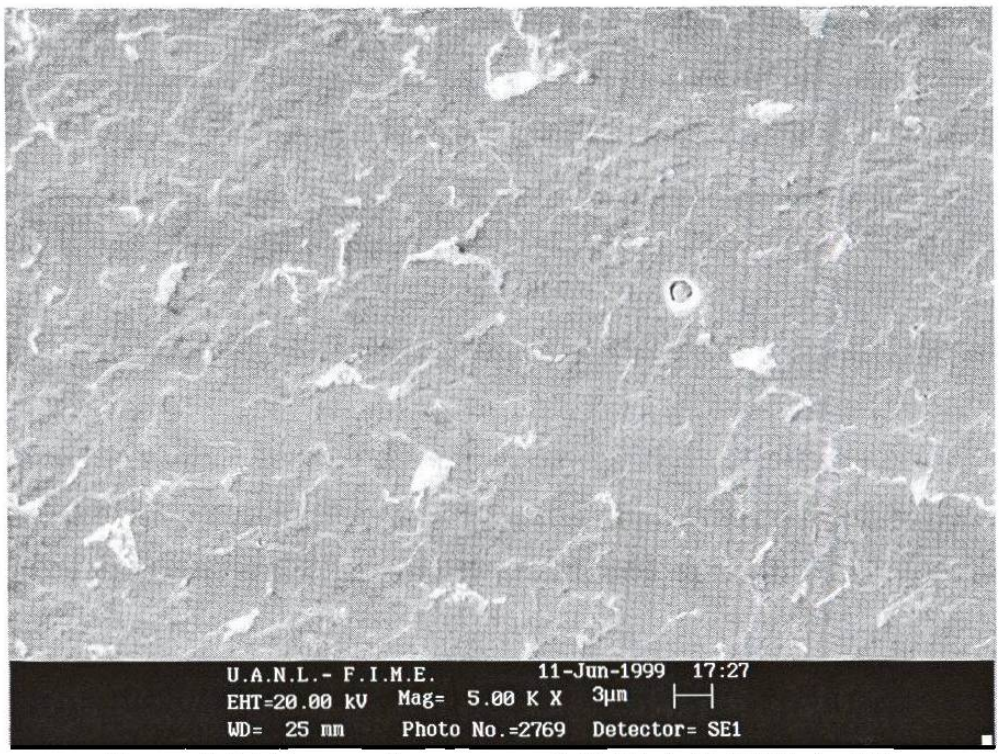


Figura 6.24 Muestra B, acero con 0.064% de C (SEM) 15 KX

6.5 Comentarios finales

Las figuras 6.3 a 6.8 indican que los únicos aceros que muestran anisotropía, aunque no en todas sus propiedades, son los A3 y B, sobre todo en lo que se refiere al inicio de la deformación plástica homogénea (límite de cedencia e inicio de deformación homogénea). Por otro lado, las micrografías, figuras 6.17 a 6.20, muestran claramente que el tamaño de grano en los aceros sigue la secuencia A1 > A2 >A3 > B. En las tres primeras muestras, esta refinación de grano se puede asociar a la menor temperatura de acabado, Tabla 5.3.

Es importante considerar también la diferencia en espesor de las muestras, Tabla 5.2, puesto que al pasar la lámina por las mesas de enfriamiento, la cinta más delgada perderá calor más rápido y el inicio de la transformación de austenita a ferrita se presentará a una menor temperatura [5] y la estructura resultante será más fina.

Desgraciadamente, no fue posible obtener las temperaturas de enrollado (una vez formado el rollo, el enfriamiento depende de la masa de este, no del espesor de la lámina), sin embargo, si se supone que todas las cintas se enrollan en el mismo intervalo de temperatura, la tasa de enfriamiento será mayor mientras menor sea el espesor, dado que la velocidad a la que viaja la cinta es mayor.

El caso del acero B merece tomarse en forma diferente, puesto que su espesor se encuentra entre los de las muestras A1 y A2, Tabla 5.2, pero está más aleado, Tabla 5.1. Se realizó un análisis de las temperaturas críticas de transformación de los aceros de las muestras A3 y B, Apéndice C, en las que se aprecia la posibilidad de que este último pueda ser susceptible a transformar parcialmente en bainita si el enfriamiento es lo suficientemente rápido.

Otro aspecto a considerar es el de la recristalización, que es un fenómeno que depende tanto de la temperatura como de la composición del acero (se calculan energías de activación para la recristalización de 289 y 294 KJ/mol respectivamente para los aceros A3 y B [6]), por lo que es de esperar que las muestras de los aceros A3 y B no recristalicen con la facilidad que lo harían las A1 y A2.

Muestra	Dureza RB
A1	53
A2	67.3
A3	52.1
B	84

Tabla 6.3 Dureza de las diferentes muestras

La anisotropía observada en las muestras A3 y B en el esfuerzo de cedencia principalmente, se puede deber a diferentes causas. El acero A3 fue laminado a menor espesor que los otros dos de su tipo, por lo tanto la velocidad de enfriamiento para este fue mayor que en los en los otros casos, además de que la temperatura final de laminación es menor (851°C) apenas unos 20°C arriba de la temperatura de

transformación que se marca en el diagrama de fases, aunque como ya se vio, la calculada (Apéndice C) es menor, esto impide que el grano crezca tanto como en los otros.

La Tabla 6.3 muestra las durezas que presentaron cada una de las muestras. En esta se observa que el acero B presentó el mayor valor seguido del acero A2, lo cual descarta que la anisotropía observada en el acero A3 pudiera deberse a una mayor densidad de dislocaciones por deformación que estén acumuladas debido a una recuperación pobre del material, ya que esto se reflejaría en la dureza, al contrario presenta el menor valor de los cuatro aceros. Por otro lado, al observar la micrografía se ve una poca cantidad de carburos, precipitados en los límites de grano, aunque de las tres muestras es la que mayor cantidad de ellos presenta, estos podrían estar influenciando sobre la anisotropía, mediante el estudio realizado con el analizador de imágenes se vio que este acero tenía mayor contenido de esta fase.

En el Capítulo 3 se vio que los MnS afectan la anisotropía y principalmente en el esfuerzo de cedencia. El acero B tiene una composición con el contenido de Mn mayor, lo que implica un contenido de inclusiones de MnS alargados en la dirección de laminación, aunque sería mínimo pues el contenido de S es de 0.006%, además de que bajo un análisis de difracción de rayos x no se alcanzaron a detectar, probablemente porque con la técnica empleada sólo se puede llegar a detectar fases que estén presentes hasta en un mínimo del 5%. Por otro lado este elemento es útil para darle propiedades de resistencia al acero, las cuales podrían obtenerse direccionadas.

Referencias

[1] F.B. Pickering, "Towards improved toughness and ductility", Climax Molybdenum Co. Symp., Kyoto, 1979, pp 9.

[2] F.B. Pickering, y T. Gladman: Iron and steel Inst. Spec. Rep. No. 81 (1963), pp 10.

[3] S. Mishra y C. Därmann: Int. Met. Rev., vol. 27 (1982), pp 307.

[4] P. Messien y J.C. Herman: International symposium on low-carbon steel for the 90's. Ed. R. Asfahani y G. Tither, The minerals metals and materials society, 1993.

[5] J.C. Morales, C. García, R Colás y L.A. Leduc: Recent advances un heat transfer and micro-structure modelling for metal processing. ASME vol. 67, (1995) pp 45.

[6] R. Colás: Journal of Mat. Proc. Tech. Vol. 62 (1996), pp 180.

Capítulo 7

Conclusiones y Recomendaciones

Los resultados encontrados en la presente investigación permiten concluir lo siguiente:

1. Los ensayos de tensión uniaxial, realizados en diferentes direcciones con respecto a la dirección de laminación. son una buena herramienta para caracterizar la anisotropía de un material, tal y como se hizo en muestras de dos tipos de aceros laminados en caliente a diferentes espesores.
2. De las cuatro láminas estudiadas solamente dos presentaron anisotropía. Viéndose afectados principalmente el límite elástico y el punto de inicio de deformación homogénea.
3. Se observó que las propiedades mecánicas cambian dependiendo de la dirección en que se midan, mostrando una tendencia a incrementarse en la dirección transversal a la dirección de laminación
4. La composición química influyó tanto en las propiedades mecánicas como en el tamaño de grano de los aceros. El contenido de carbono proporcionó mayor resistencia, en tanto que el manganeso y niobio produjo estructuras con tamaño de grano ferrítico menor.
5. El espesor final de la lámina influye en la anisotropia, esto puede ser asociado a varios factores, dentro los que se encuentran la reduccion a las temperaturas de

deformación en el molino y la velocidad de enfriamiento que implica. Así como la precipitación de segundas fases o carburos.

6. Existe desacuerdo entre el valor registrado de R y la anisotropía de las muestras, puesto que este valor resulta ser mayor en las muestras con menor anisotropía.
7. El factor ΔR fue de utilidad para describir el comportamiento de los materiales isotrópicos, además que presentó valores más alejados de cero para las muestras más anisotrópicas.
8. La morfología, el tamaño de grano y las fases presentes son un factor importante en la resistencia mecánica.
9. Se recomienda analizar la Textura del material, para determinar si es que la hay y su influencia en la anisotropía observada.
10. Se recomienda hacer un estudio con ayuda de microscopía electrónica de transmisión para determinar la densidad de dislocaciones presentes en las láminas.
11. Con el objeto de obtener resultados que se puedan comparar se recomienda hacer el mismo estudio con aceros laminados en caliente a un mismo espesor (<1.06mm) variando la cantidad de elementos microaleantes, como el Mn para estudiar su efecto sobre la anisotropía.
12. Para determinar el comportamiento de la anisotropía a través del ancho de la lámina, se recomienda hacer un estudio similar diferenciando las probetas dependiendo del lugar en que fueron cortadas, cerca de la orilla y cerca del centro.

APÉNDICE A

Gráficas de esfuerzo-deformación real de los ensayos realizados.

Muestra A_l

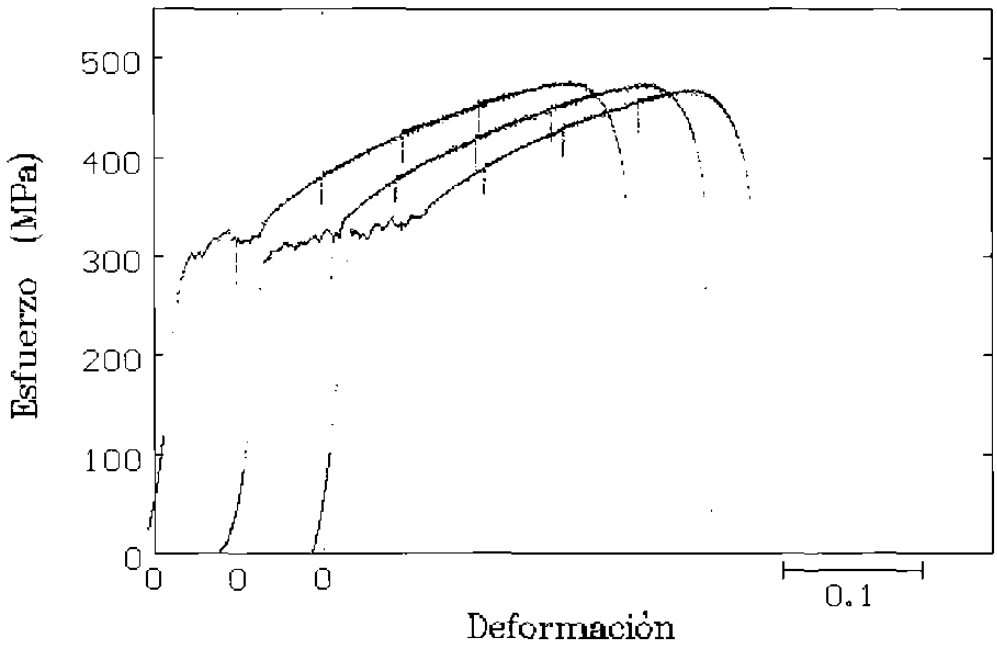


Fig. A.1 longitudinal

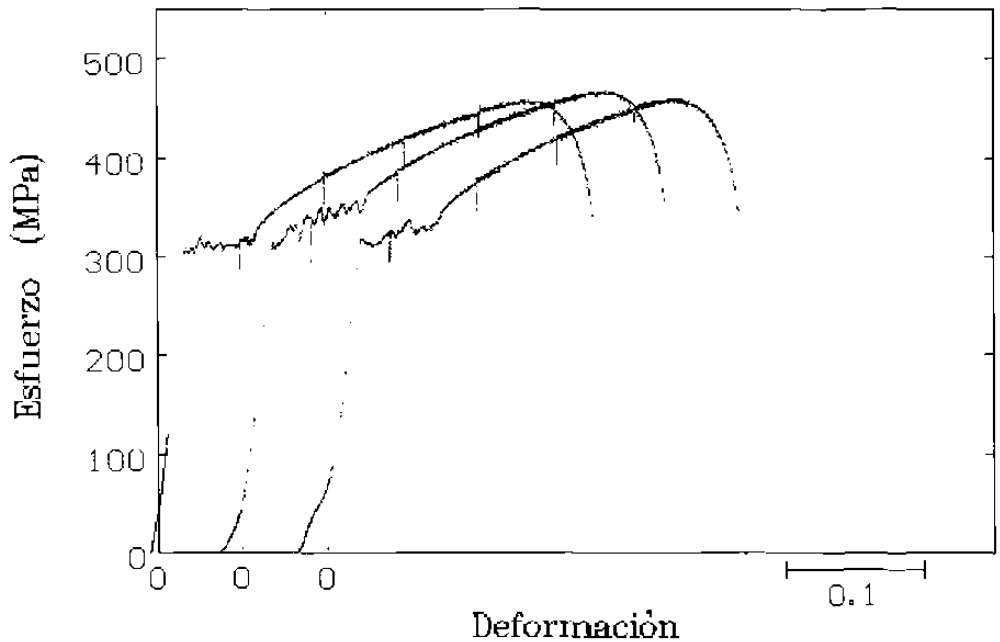


Fig. A.2 45°

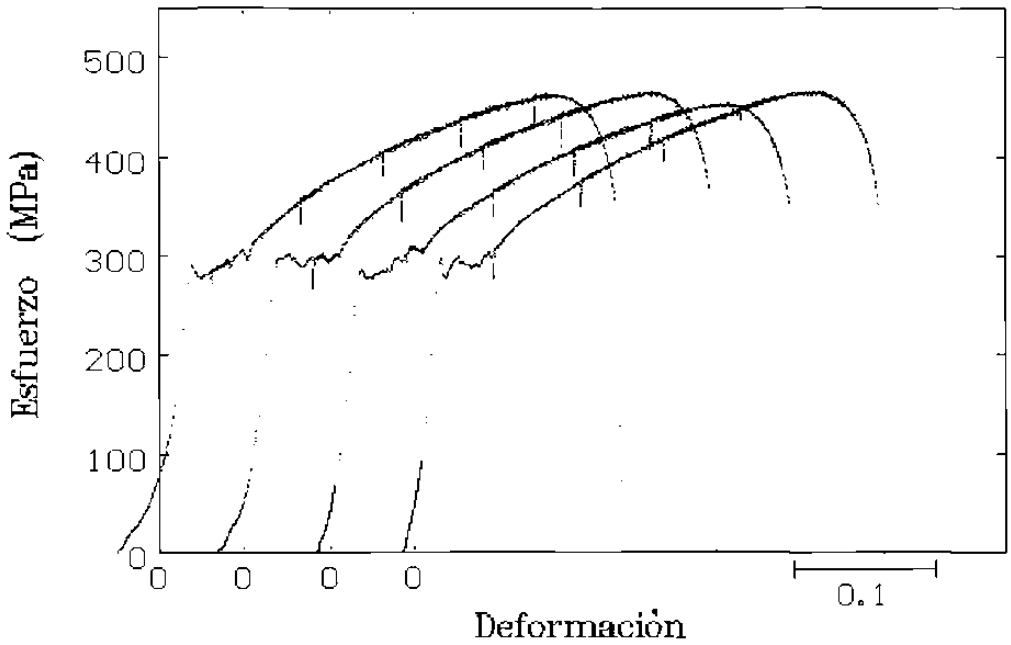


Fig. A.3 Transversal

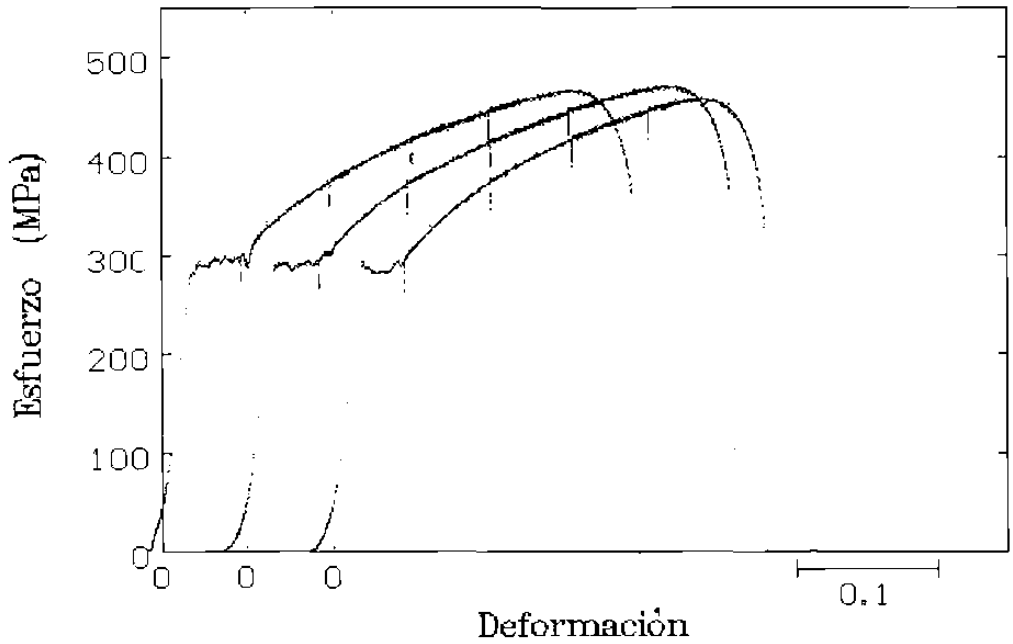


Fig. A.4 Longitudinal

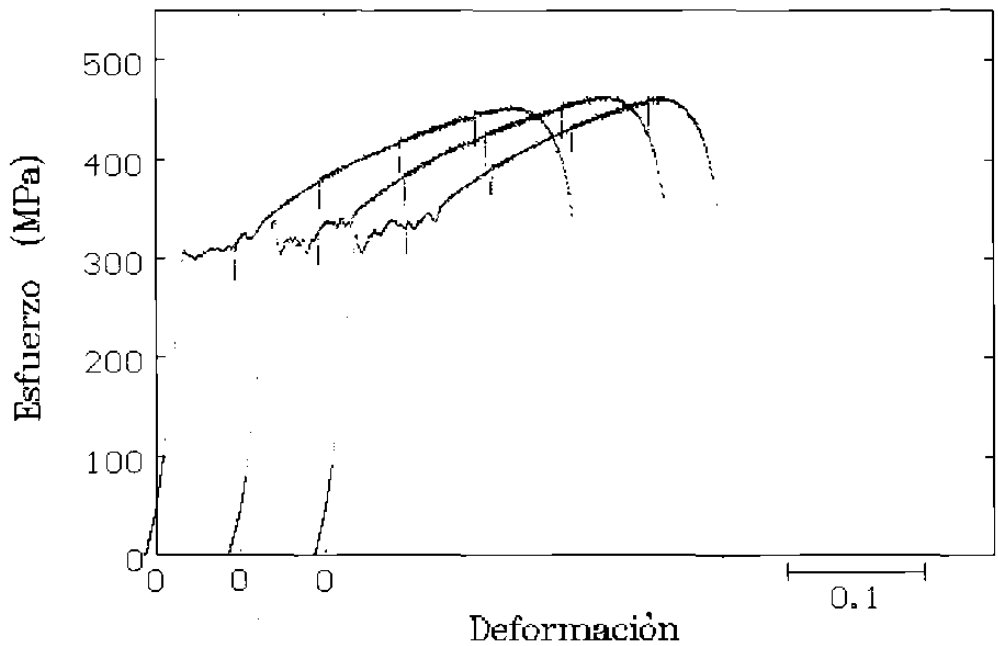


Fig. A.5 45°

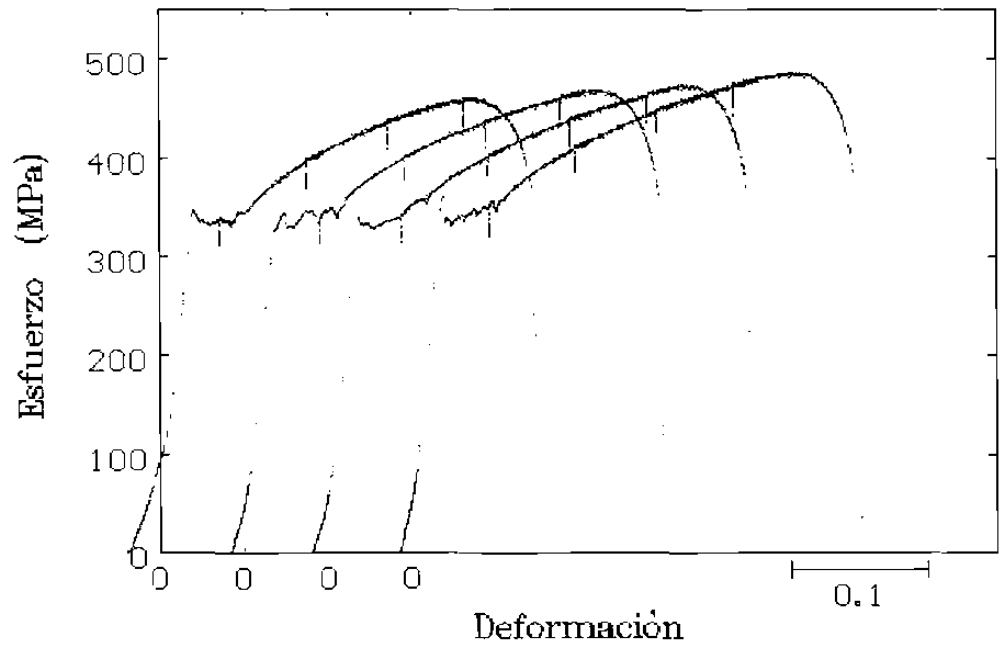


Fig. A.6 Transversal

Muestra A.$_2$

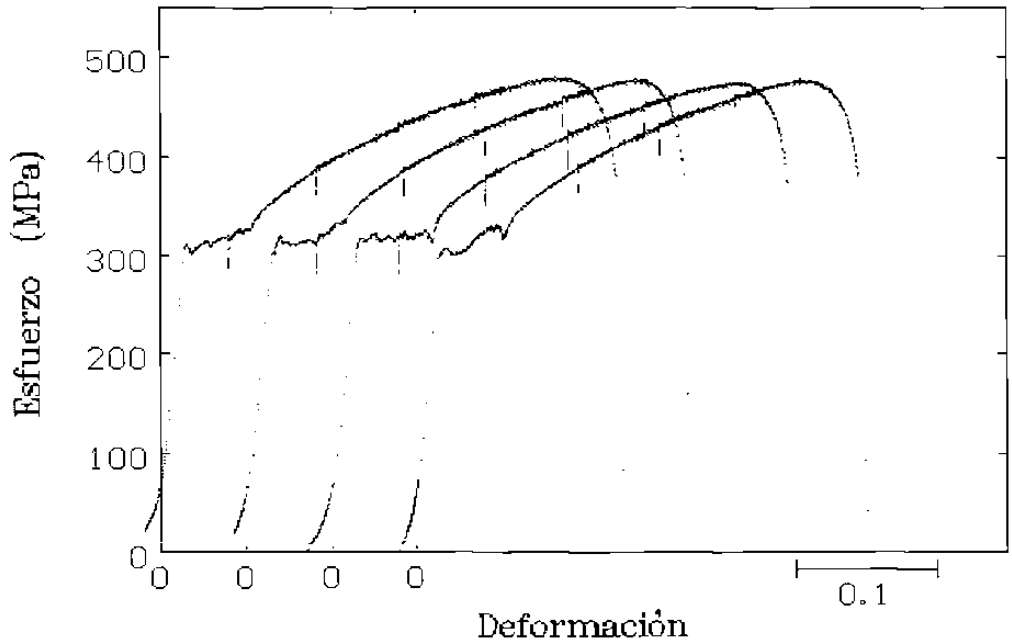


Fig. A.^{7} Longitudinal

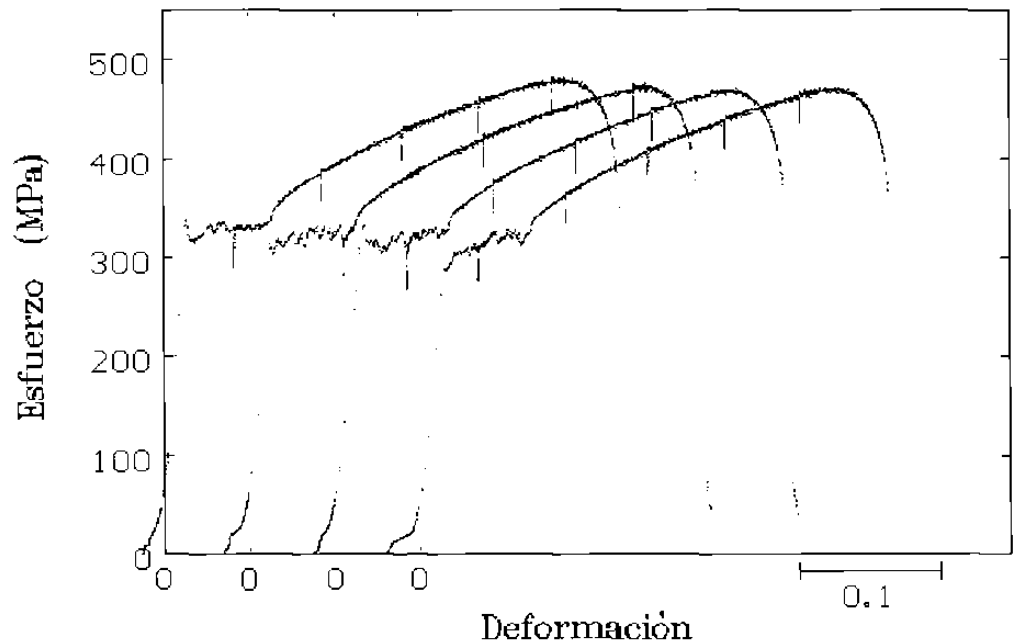


Fig. A.8 45°

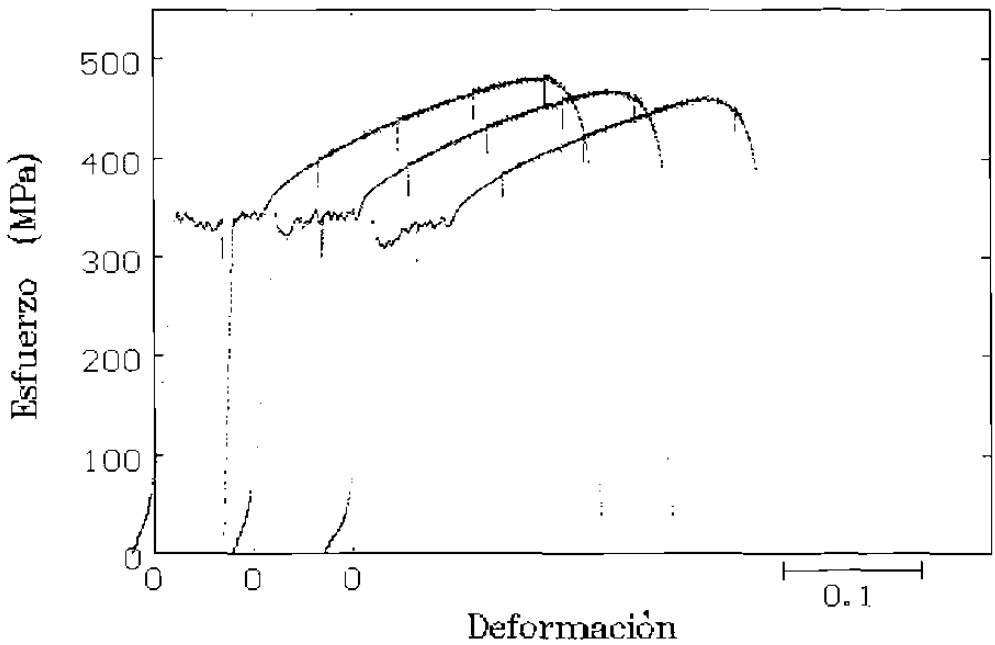


Fig. A.9 Transversal

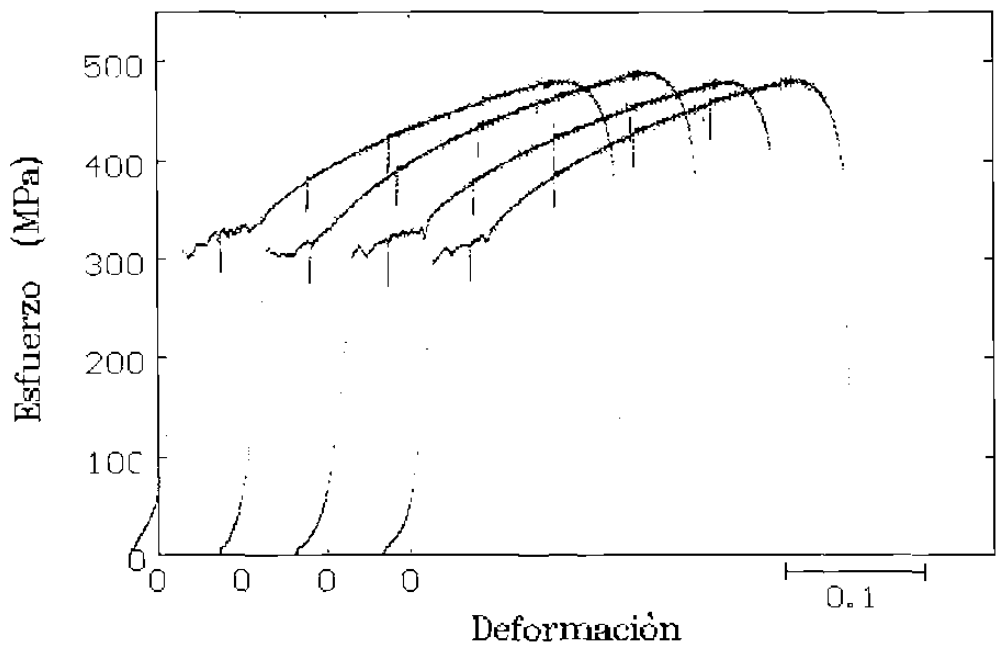


Fig. A.10 Longitudinal

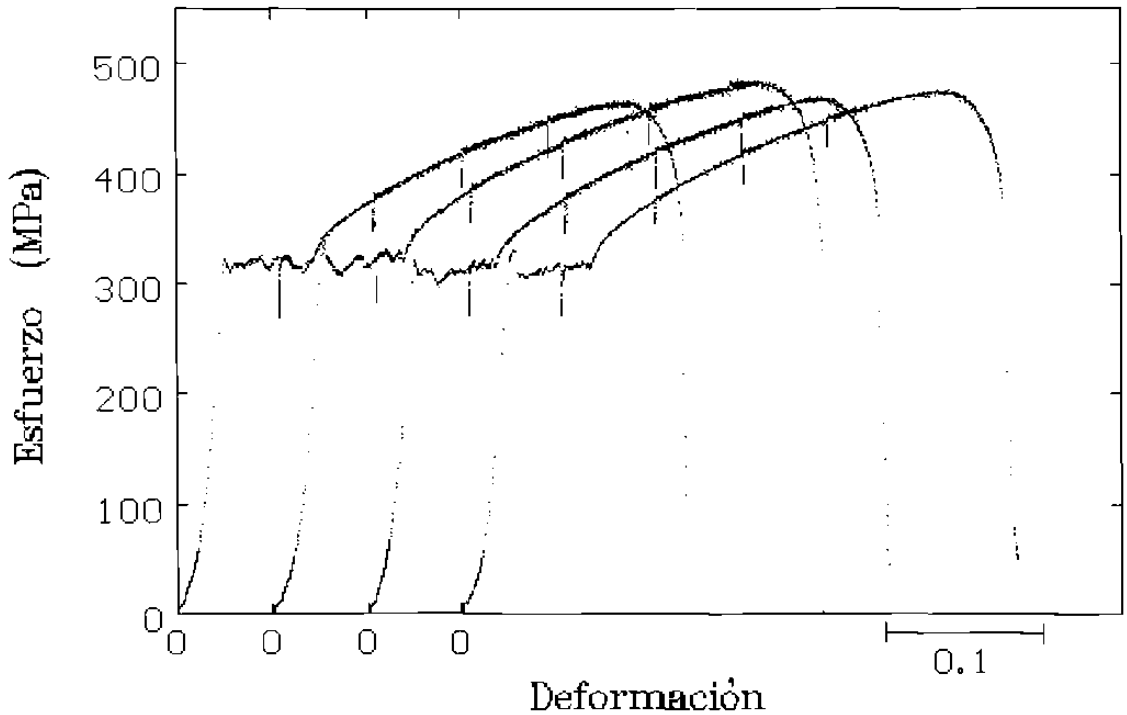


Fig. A.11 45°

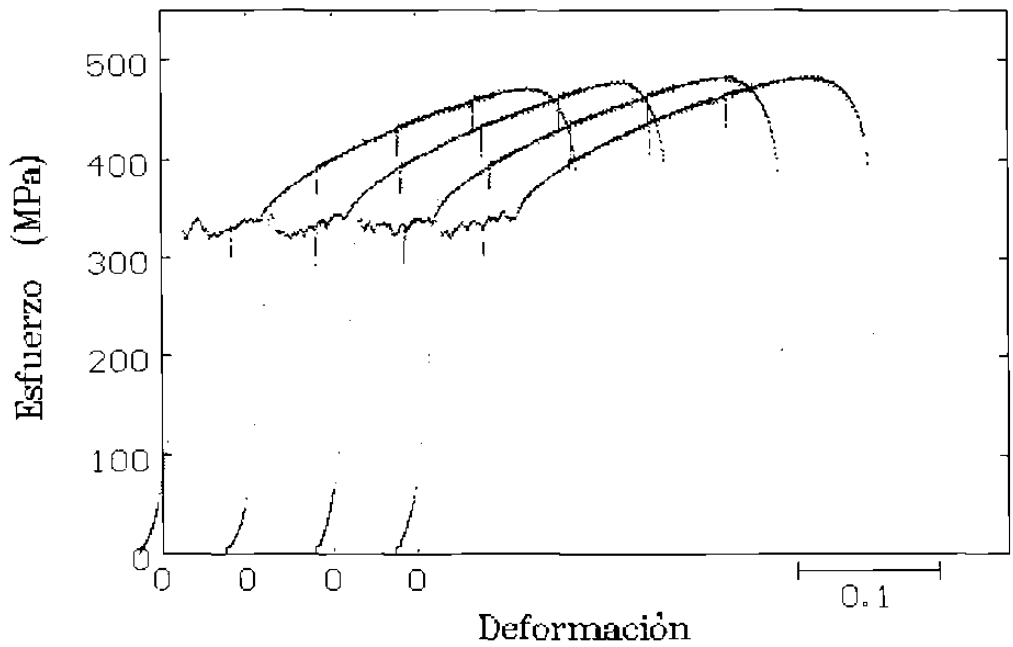


Fig. A.12 Transversal

Muestra A_3

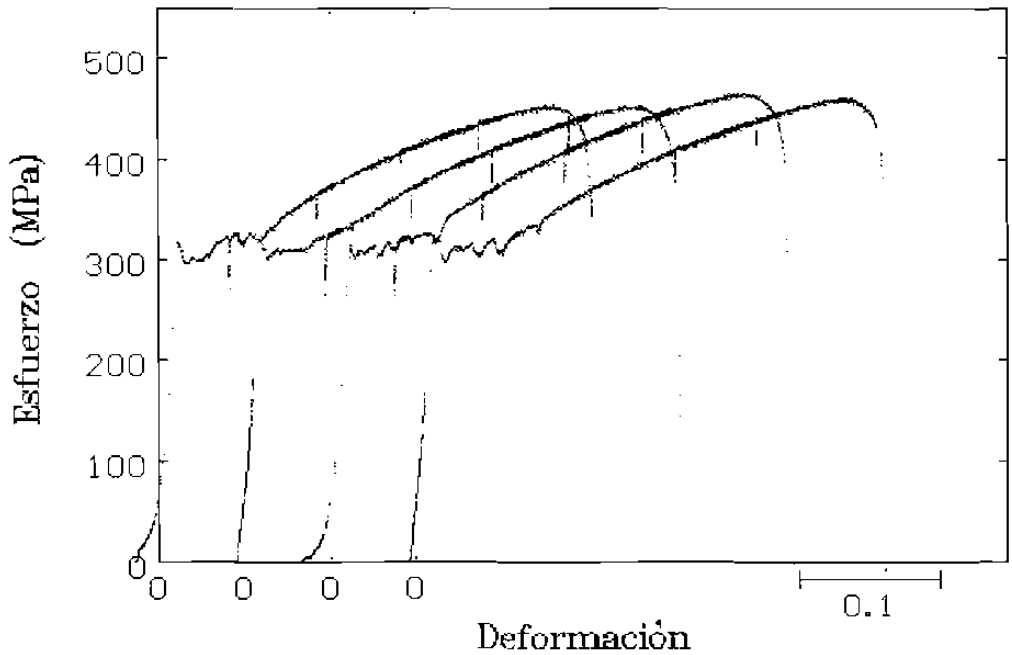


Fig. A.13 Longitudinal

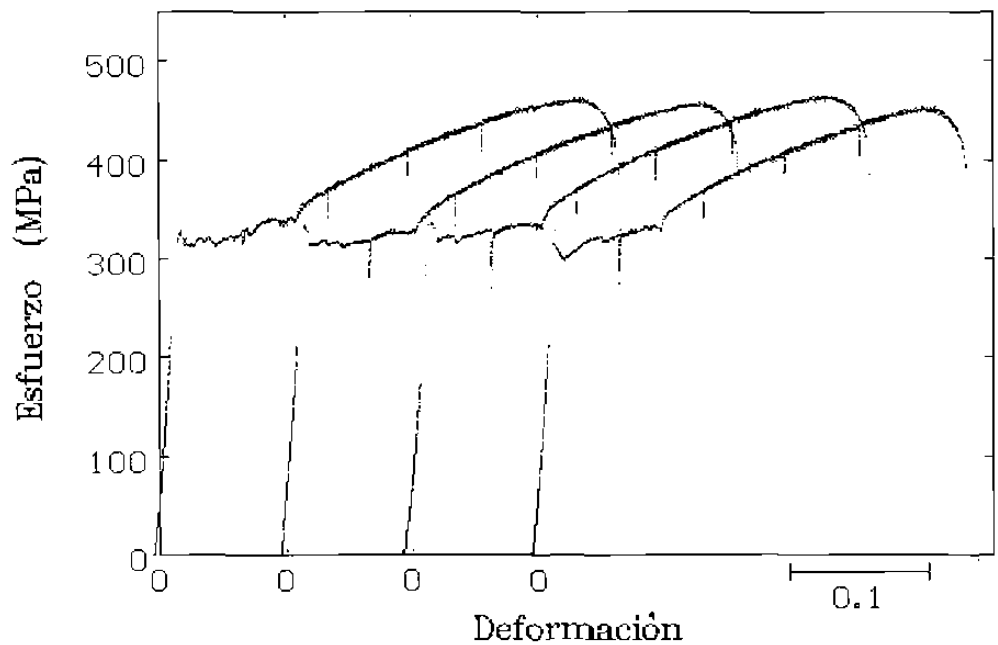


Fig. A.14 45°

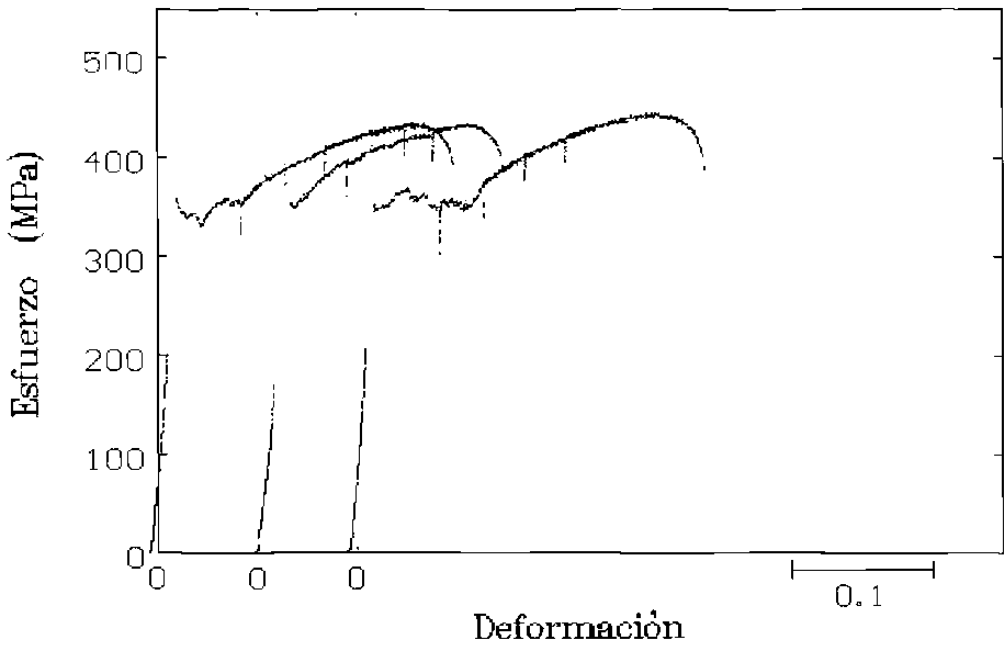


Fig. A.15 Transversal

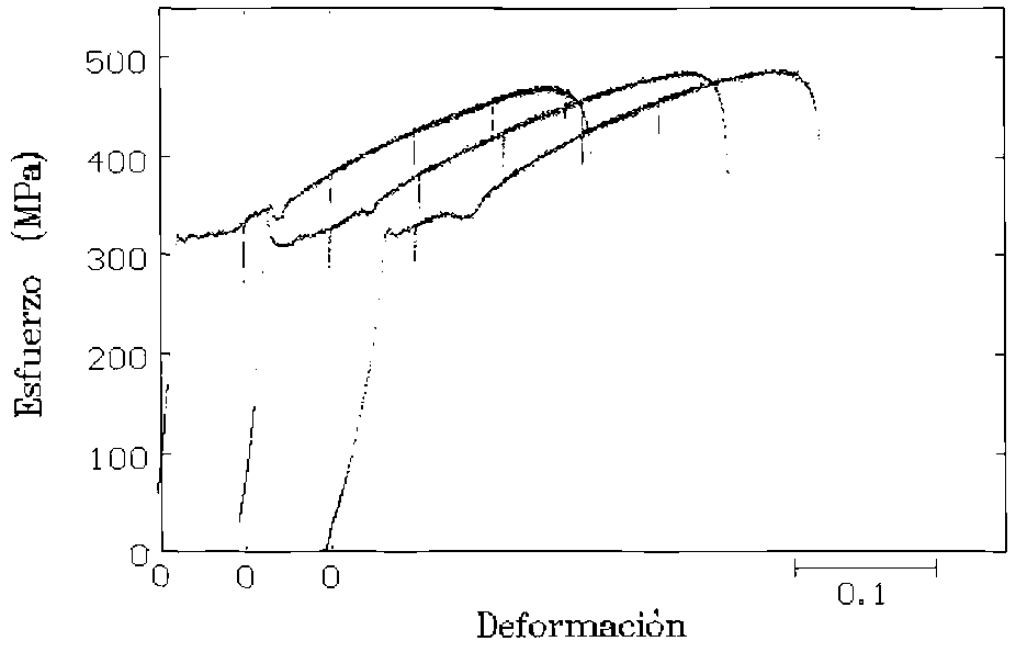


Fig. A.16 Longitudinal

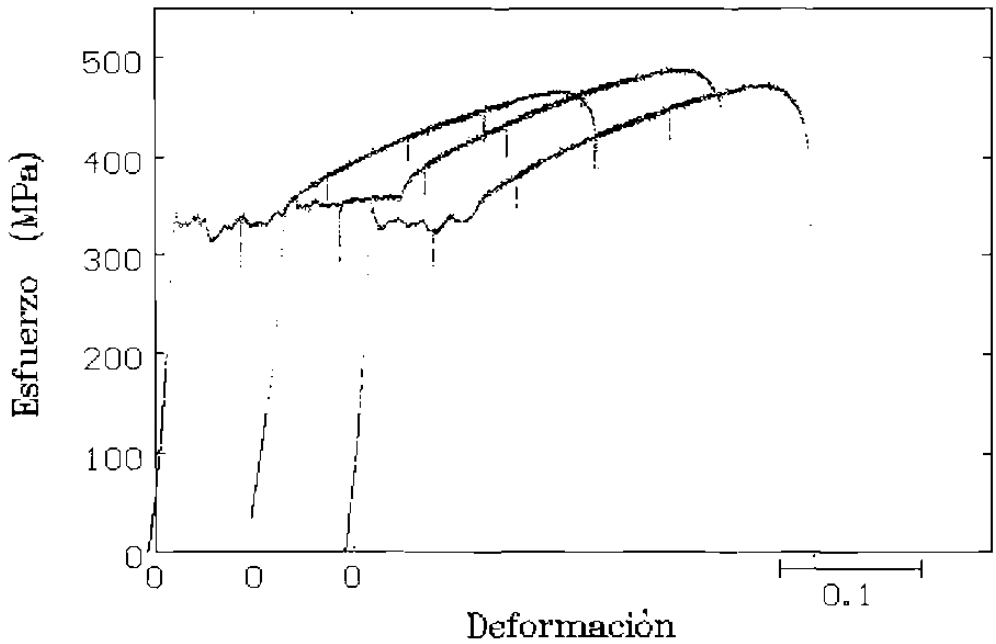


Fig. A.17 45°

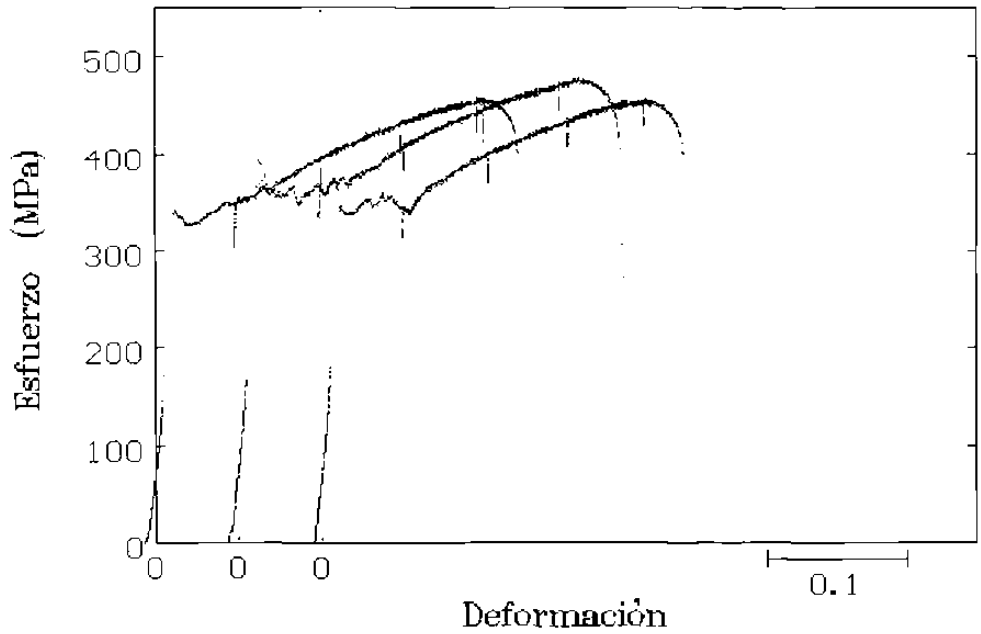


Fig. A.18 Transversal

Muestra B

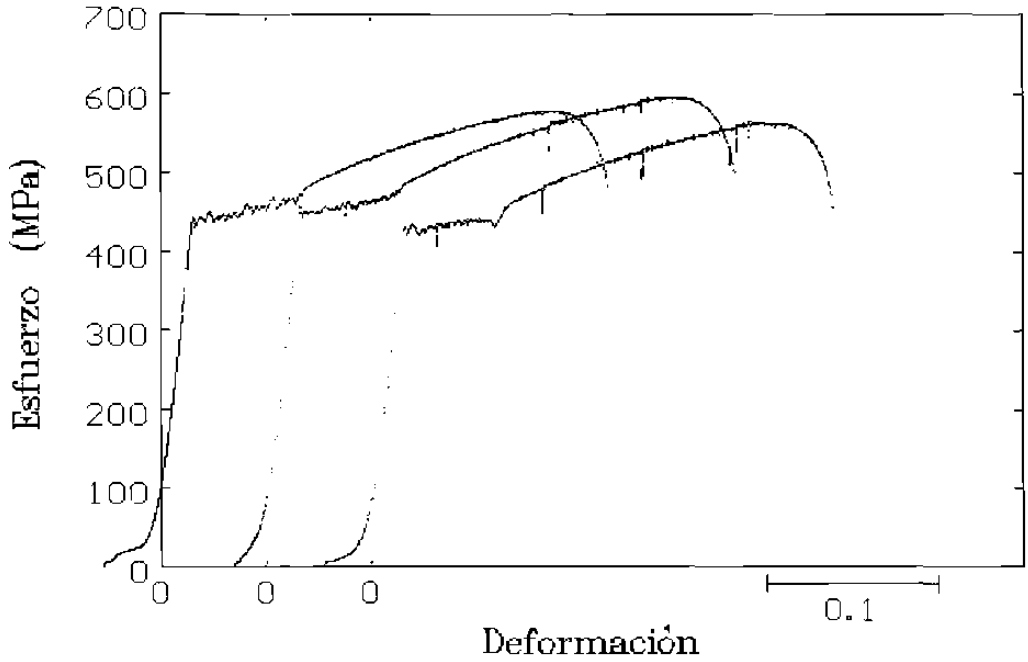


Fig.A.19 Longitudinal

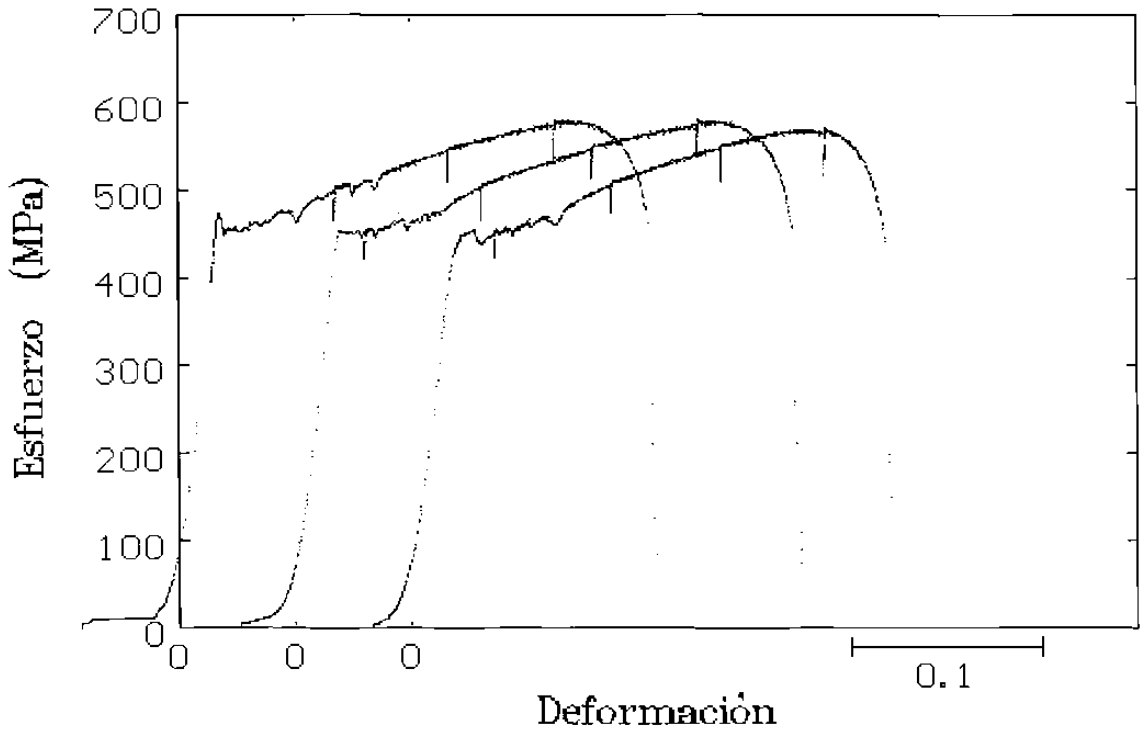


Fig. A.20 45°

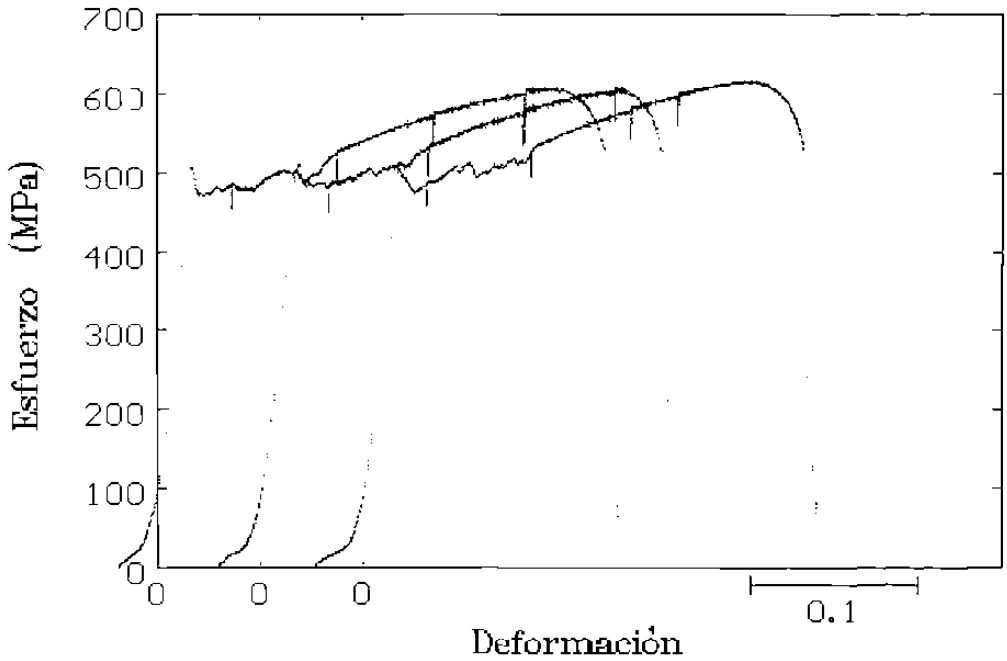


Fig. A.21 Transversal

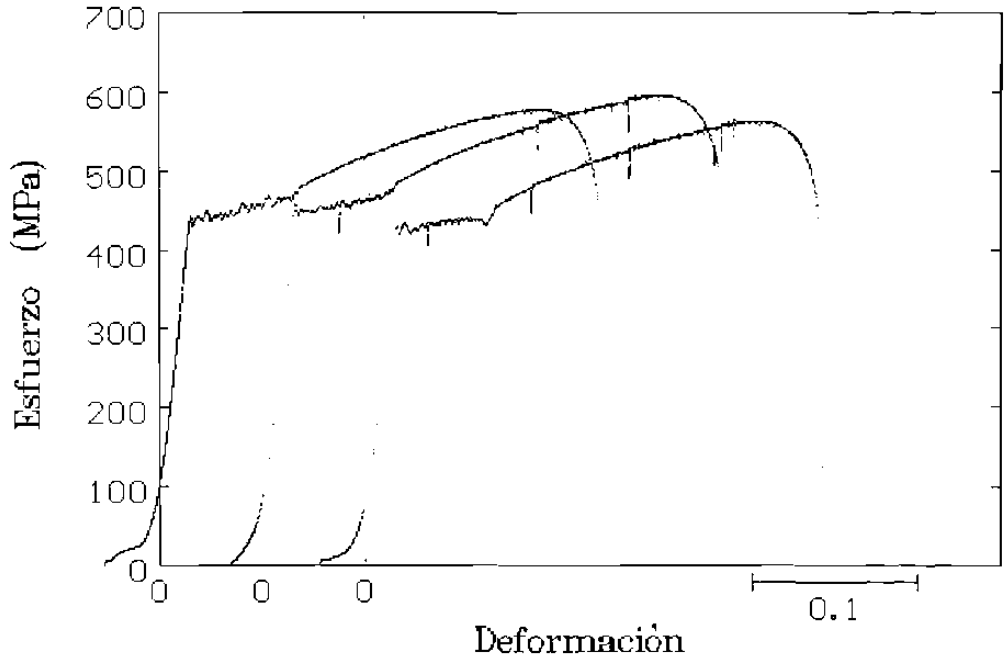


Fig. A.22 Longitudinal

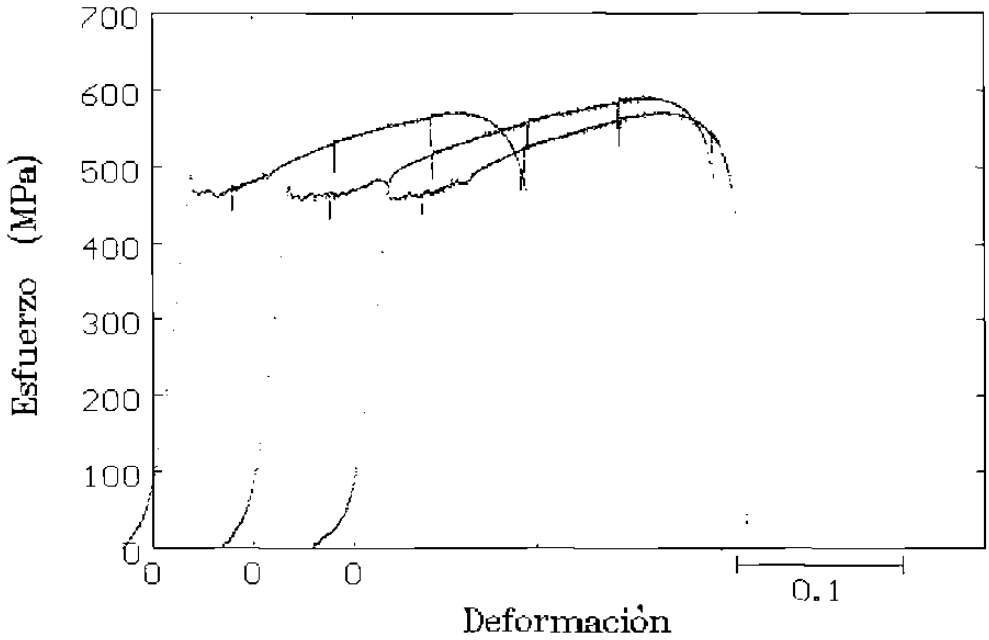


Fig. A.23 45º

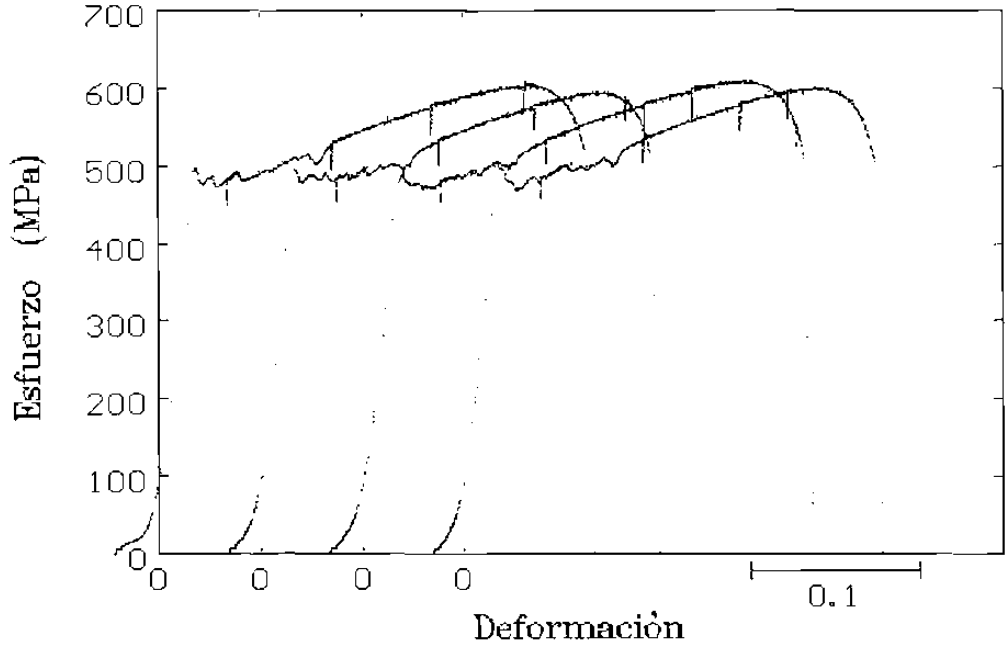


Fig. A.24 Transversal

Apéndice A (continuación)

En la siguiente sección se muestran los datos obtenidos de los ensayos de tensión para cada uno de los aceros, se hace referencia a la figura correspondiente para mayor información.

Tabla A.1, resultados de los ensayos del acero A_1.

Muestra A1	ε_0	σ_0	ε_l	σ_L	ε_m	σ_m	n	k
Fig. A.1	0.035	299.1	0.081	322.4	0.31	475.1	0.285	688.1
	0.021	296.0	0.071	320.9	0.293	473.5	0.260	666.9
	0.021	319.6	0.073	341.8	0.272	466.1	0.270	696.9
Fig. A.2	0.021	303.7	0.068	316.2	0.272	456.4	0.248	644.1
	0.023	306.9	0.086	344.2	0.267	465.7	0.243	653.8
	0.025	316.2	0.079	331.8	0.259	456.4	0.250	650.1
Fig. A.3	0.028	278.8	0.062	294.4	0.280	461.1	0.289	678.9
	0.023	296.0	0.066	300.6	0.294	464.2	0.289	678.5
	0.024	277.3	0.066	303.7	0.284	451.7	0.275	657.2
	0.021	275.7	0.055	297.5	0.284	465.7	0.280	681.5
Fig. A.4	0.023	281.9	0.059	289.7	0.299	464.2	0.268	652.7
	0.019	289.7	0.059	299.1	0.305	468.9	0.269	665.7
	0.021	291.3	0.049	289.7	0.265	457.9	0.268	662.5
Fig. A.5	0.020	308.4	0.069	319.3	0.258	451.7	0.263	663.2
	0.029	303.7	0.079	331.8	0.263	462.6	0.264	661.1
	0.026	303.7	0.08	334.9	0.242	461.1	0.264	678.5
Fig. A.6	0.028	334.9	0.050	330.2	0.227	459.5	0.230	652.7
	0.021	325.5	0.066	339.6	0.260	465.7	0.215	629.8
	0.023	331.8	0.07	352.0	0.264	470.4	0.215	629.8
	0.023	334.9	0.06	344.2	0.281	482.9	0.214	642.5

Tabla A.2 Muestra A_2

Muestra A_2	ε_0	σ_0	ε_l	σ_L	ε_m	σ_m	n	k
Fig. A.7	0.021	303.7	0.063	325.6	0.290	478.2	0.247	662.7
	0.025	311.5	0.069	333.3	0.281	475.1	0.251	661.5
	0.022	311.5	0.071	311.5	0.293	473.5	0.249	652.5
	0.024	299.1	0.062	317.8	0.285	475.1	0.249	659.0
Fig. A.8	0.019	314.6	0.074	334.9	0.289	478.2	0.248	659.0
	0.017	303.7	0.074	331.8	0.288	470.4	0.251	657.0
	0.022	316.2	0.078	322.4	0.288	467.3	0.269	665.5
	0.017	288.2	0.078	325.6	0.298	468.9	0.263	652.6
Fig. A.9	0.017	339.6	0.078	344.2	0.286	479.8	0.248	668.1
	0.018	328.7	0.073	338.0	0.268	464.2	0.240	660.4
	0.02	311.5	0.071	330.2	0.262	459.5	0.235	642.1
Fig. A.10	0.022	300.6	0.073	336.5	0.295	479.8	0.248	656.7
	0.02	305.3	0.051	316.2	0.291	487.5	0.255	676.9
	0.027	302.8	0.07	323.4	0.295	476.6	0.257	669.2
	0.017	295.0	0.055	317.8	0.283	479.6	0.242	668.0
Fig. A.11	0.02	306.9	0.067	305.3	0.275	461.1	0.254	652.1
	0.026	305.3	0.069	314.6	0.299	476.1	0.268	681.4
	0.019	302.2	0.069	311.5	0.286	461.1	0.246	633.6
	0.021	302	0.068	310	0.303	468.8	0.262	657.2
Fig. A.12	0.017	319.3	0.069	338	0.265	470.4	0.245	660.6
	0.02	327.1	0.069	339.6	0.270	475.1	0.241	663.4
	0.023	327.1	0.071	331.8	0.285	481.3	0.245	658.8
	0.018	322.4	0.069	339.6	0.284	481.3	0.239	667.2

Tabla A.3 resultados para el acero A_3.

Muestra A_3	ε_0	σ_0	ε_l	σ_l	ε_m	σ_m	n	k
Fig. A.13	0.019	296.0	0.071	317.8	0.278	451.7	0.243	625.7
	0.016	302.2	0.044	310.0	0.281	450.2	0.250	630.4
	0.016	300.6	0.076	319.3	0.297	462.6	0.251	640.3
	0.021	297.5	0.059	306.9	0.307	459.5	0.254	627.1
Fig. A.14	0.021	313.1	0.097	338.0	0.305	459.5	0.246	623.1
	0.016	313.1	0.092	328.7	0.302	459.8	0.253	624.3
	0.018	317.8	0.093	334.9	0.298	462.6	0.243	620.4
	0.019	299.1	0.088	328.7	0.285	450.2	0.25.3	633.4
Fig. A.15	0.021	338.0	0.058	348.9	0.182	433.0	0.153	561.8
	0.023	348.9	0.064	395.6	0.153	431.5	0.112	531.8
	0.015	345.8	0.079	348.9	0.224	440.8	0.209	621.4
Fig. A.16	0.012	320.9	0.091	356.7	0.275	472.0	0.283	699.9
	0.015	341.1	0.092	356.58	0.318	486.0	0.245	648.5
	0.027	320.9	0.094	352.0	0.311	482.9	0.257	654.9
Fig. A.17	0.015	342.7	0.095	353.6	0.289	467.3	0.247	657.6
	0.019	352.0	0.100	355.1	0.311	484.4	0.243	655.3
	0.015	345.8	0.093	358.3	0.301	472.5	0.244	644.5
Fig. A.18	0.019	333.3	0.085	361.4	0.239	454.8	0.237	647.4
	0.022	356.7	0.08	367.6	0.255	473.5	0.221	647.8
	0.013	344.2	0.065	339.6	0.242	453.3	0.223	633.7

Tabla A.4 resultados del acero B.

Muestra B	ε_0	σ_0	ε_l	σ_L	ε_m	σ_m	n	K
Fig. A.19	0.019	440.5	0.079	471.0	0.227	577.9	0.197	782.5
	0.020	442.7	0.076	473.2	0.224	594.3	0.203	812.1
	0.021	429.9	0.073	429.6	0.236	564.8	0.202	768.7
Fig. A.20	0.024	449.2	0.101	499.4	0.213	577.9	0.171	766.9
	0.022	451.4	0.070	466.7	0.221	577.9	0.171	745.2
	0.036	438.3	0.076	457.9	0.219	569.2	0.171	739.9
Fig. A.21	0.024	473.2	0.094	497.2	0.237	606.2	0.187	800.1
	0.026	484.1	0.088	508.1	0.215	606.2	0.178	801.3
	0.031	475.4	0.098	512.5	0.236	615.0	0.185	808.2
Fig. A.22	0.022	447.0	0.067	402.3	0.240	597.5	0.192	789.6
	0.023	434.0	0.075	462.3	0.243	586.6	0.197	793.8
	0.022	436.1	0.073	462.3	0.223	586.6	0.194	783.6
Fig. A.23	0.024	467.3	0.069	484.1	0.190	568.0	0.169	765.3
	0.023	457.9	0.081	474.8	0.241	588.8	0.169	751.2
	0.022	457.9	0.068	480.4	0.194	570.1	0.169	759.4
Fig. A.24	0.025	477.6	0.094	501.6	0.223	604.1	0.182	802.8
	0.024	478.5	0.088	500.9	0.205	592.5	0.181	804.3
	0.028	474.8	0.090	502.8	0.230	607.5	0.194	814.5
	0.025	480.4	0.090	500.9	0.218	598.1	0.181	802.3

APÉNDICE B

Tabla B1

Muestra A1

Dirección	σ_0	σ_{max}	n	K
Longitudinal	296.26	467.6	0.27	672.08
a 45°	307.1	458.99	0.25	658.47
Transversal	306.85	465.15	0.25	656.37

Muestra A2

Dirección	σ_0	σ_{max}	n	K
Longitudinal	303.69	478.18	0.25	663.27
a 45°	296.16	469.05	0.26	657.32
Transversal	325.28	472.32	0.24	659.69

Muestra A3

Dirección	σ_0	σ_{max}	n	K
Longitudinal	307.35	468.65	0.26	654.89
a 45°	313.1	462.82	0.25	631.31
Transversal	345.32	447.82	0.19	606.82

Muestra B

Dirección	σ_0	σ_{max}	n	K
Longitudinal	438.36	584.79	0.20	788.39
a 45°	453.67	575.30	0.17	754.65
Transversal	477.7	604.84	0.18	804.59

Tabla B.1. Propiedades mecánicas de los aceros obtenidos de las gráficas de esfuerzo contra deformación real.

Tabla B2

Muestra Ancho Espesor Elongación (mm)			Muestra Ancho Espesor Elongación (mm)		
A_1, Prueba 1			A_1, Prueba 2		
13.28	2.58	0	13.17	2.6	0
13.19	2.58		13.2	2.59	
13.2	2.58		13.22	2.59	
13.28	2.54	4	12.88	2.52	4
12.91	2.52		13.21	2.57	
12.87	2.5		12.9	2.5	
12.71	2.47	8	12.79	2.47	8
12.63	2.46		12.7	2.49	
12.65	2.46		12.74	2.49	
12.36	2.39	12	12.44	2.39	12
12.31	2.38		12.33	2.4	
12.37	2.39		12.43	2.42	
12.09	2.35	16	12.09	2.34	16
12	2.33		11.95	2.32	
12.01	2.32		12.05	2.35	

Tabla B2. valores obtenidos en cuatro ensayos de tensión de la muestra A_1 cortada siguiendo la dirección de laminación

Continuación

Muestra Ancho Espesor Elongación (mm)			Muestra Ancho Espesor Elongación (mm)		
A_1, Prueba 3			A_1, Prueba 4		
13.41	2.61	0	13.21	2.58	0
13.29	2.62		13.24	2.57	
13.29	2.61		13.25	2.57	
13.17	2.57	4	13.2	2.53	4
13.1	2.57		12.99	2.49	
13.06	2.54		12.91	2.5	
12.74	2.5	8	12.7	2.46	8
12.74	2.49		12.68	2.45	
12.81	2.51		12.69	2.46	
12.42	2.43	12	12.32	2.38	12
12.45	2.44		12.31	2.37	
12.48	2.41		12.31	2.38	
12.03	2.37	16	12.1	2.29	16
12.06	2.36		11.84	2.32	
12.17	2.36		11.99	2.29	

Tabla B2 continuación, valores obtenidos en los cuatro ensayos de tensión de la muestra A_1 cortada siguiendo la dirección de laminación

Tabla B3

Muestra	R_0	Muestra	R_0	Muestra	R_0	Muestra	R_0
A_1 0°	1.19	A_2 0°	1.68	A_3 0°	1.08	B 0°	1.55
A_1 45°	1.39	A_2 45°	0.93	A_3 45°	0.71	B 45°	0.71
A_1 90°	0.96	A_2 90°	1.13	A_3 90°	1.19	B 90°	1.03

Tabla de los valores R_0 obtenidos.

APÉNDICE C

A continuación se presenta el análisis de temperaturas de transformación realizado para las muestras A_3 y B según diferentes autores.

Muestra A_3

Transformación de perlita (A_{C1}) y ferrita (A_{C3}) en austenita

Andrews: A_{C1}=721.0°C A_{C3}=865.0°C

Kasatkin y coautores: A_{C1}=719.8°C A_{C3}=898.4°C

Transformación a martensita

Payson y Savage: Ms=461.6°C

Carapella: Ms=456.1°C

Rowland y Lyle: Ms=460.8°C

Grange y Stewart: Ms=497.1°C

Nehrenberg: Ms=530.3°C

Steven y Haynes: Ms=530.3°C

Temperatura a (según Steve y Haynes):

10% – 520.3°C

50% – 483.3°C

90% = 427.3°C

99% = 315.3°C

Andrews (lineal): Ms=511.5°C

Andrews (producto): Ms=488.9°C

Transformación a bainita (Steven y Haynes)

Inicio (Bs)=797.2°C

Temperatura a la que se transforma 50% de bainita (B50)=737.2°C

Temperatura de fin de bainita (BF) 737.2°

Tiempo máximo permisible para obtener (Kunitake y Ohtani):

Martensita: 0.0 seg.

Bainita (sin ferrita ni perlita): 0.03 seg.

Ferrita y bainita o martensita (sin perlita): 0.30 seg.

Muestra B

Transformación de perlita (A_{C1}) y ferrita (A_{C3}) en austenita

Andrews: A_{C1}=714.5°C A_{C3}–859.1°C

Kasatkin y coautores: A_{C1}=715.2°C A_{C3}–877.9°C

Transformación a martensita

Payson y Savage: Ms–436.8°C

Carapella: Ms–424.0°C

Rowland y Lyle: Ms–435.7°C

Grange y Stewart: Ms=468.2°C

Nehrenberg: Ms=437.9°C

Steven y Haynes: Ms=503.4°C

Temperatura a (según Steve y Haynes):

10% – 493.4°C

50% – 456.4°C

90% – 400.4°C

99% – 288.4°C

Andrews (lineal): Ms–486.9°C

Andrews (producto): Ms=479.9°C

Transformación a bainita (Steven y Haynes)

Inicio (Bs)=738.2°C

Temperatura a la que se transforma 50% de bainita (B50)=678.2°C

Temperatura de fin de bainita (BF)=678.2°

Tiempo máximo permisible para obtener (Kunitake y Ohtani):

Martensita: 0.1 seg.

Bainita (sin ferrita ni perlita): 0.16 seg.

Ferrita y bainita o martensita (sin perlita): 2.23 seg.

Referencias

K.W. Andrews: J. Iron Steel Inst. vol. 203 (1965) pp 721.

L.A. Carapella: Met. Progr. Vol. 46 (1944) pp 108.

R.A. Grange y C.H. Savage: Trans. AIME, vol. 167 (1946) pp 494.

O.G. Kasatkin, B.B. Vinokur y V.L. Pilyushenko: Met. Sci. Heat Treat. Vol 26 (1984) pp 27.

T. Kunitake y H. Ohtani: Sumitomo Search, nov. 1979, pp 18.

E.H. Nehrenberg: Trans AIME, vol. 167 (1946) pp 494.

P. Payson y C.H. Savage: Trans. ASM, vol. 33 (1944) pp 261.

E.S. Rowland y S.R. Lyle: Trans. ASM vol. 37 (1946) pp 27.

W. Steven y A.G. Haynes: J. Iron Steel Inst., vol. 183 (1956) pp 349.

Lista de Tablas

Tabla	Descripción	Página
5.1	Composición de los cuatro aceros estudiados	50
5.2	Espesores de las muestras	50
5.3	Proceso de laminación al que fueron sometidos los aceros en estudio	51
6.1	Valores obtenidos para R_0, R , y ΔR	71
6.2	Tamaño de gano y esfuerzo de cedencia esperado de la ec (6.6) y el obtenido de los ensayos.	72
6.3	Dureza de las diferentes muestras	79
A.1	Resultados de los ensayos del acero A1	96
A.2	Resultados de los ensayos del acero A2	97
A.3	Resultados de los ensayos del acero A3	98
A.4	Resultados de los ensayos del acero B	99
B.1	Propiedades mecánicas de los aceros obtenidos de las gráficas de esfuerzo deformación real. (sumario)	100
B.2	Valores obtenidos en cuatro ensayos de tensión de la muestra A1 cortada siguiendo la dirección de laminación	101
B.3	Tabla de valores R_0 obtenidos	102

Lista de Figuras

Figura	Descripción	Página
2.1	Estructuras cúbica centrada en el cuerpo y cíbica centrada en las caras	4
2.2	Diagrama de fases del hierro-carburo de hierro	5
2.3	Modelo de un tren de laminación continuo de seis castillos	6
2.4	Curvas de fluencia que se presentan en el acero deformado a altas temperaturas	9
2.5	Representación esquemática de los cambios en la microestructura durante la recristalización austenítica durante la laminación en caliente	13
2.6	Micrografías de la subestructura de una cero laminado en caliente	14
3.1	Ejemplificación de las texturas {100} y {111}	25
3.2	Variación del valor R con el componente de textura {111} en relación con el porciento de reducción en frío	26
3.3	Orejas formadas en diferentes direcciones por embutido profundo debido a la anisotropía del metal	27
3.4	Aspecto de las inclusiones que provocan anisotropía	29
4.1	Efecto del tamaño de grano de un acero 0.1%C sobre el esfuerzo de cedencia y la temperatura de transición dúctil-frágil en un ensayo de impacto	44
4.2	Factores que afectan a la resisitencia mecánica y a la tenacidad en aceros con ferrita y perlita	45
4.3	Combinaciones de esfuerzo de cedencia y temperatura de transición dúctil-frágil en aceros normalizados alta resistencia, baja aleación	46
5.1	Representación de los cortes para obtener probetas	52
5.2	Dimensiones de las probetas	52
5.3	Gráfica de esf. def. real del acero B	53
5.4	Gráfica logarítmica esf. def. del acero A1 cortado longitudinalemente	54
6.1	Curvas de esf. def. de los tres ensayos para la muestra A1 siguiendo la dirección longitudinal	57
6.2	Gráfica esf. def. donde se observan los puntos σ_m	59
6.3	Gráfica comparativa del esfuerzo al límite de cedencia inferior (σ_0) de las diferentes muestras	59
6.4	Gráfica comparativa del valor de esf. al inicio de la deformación homogénea (σ_I) de las diferentes muestras ensayadas	60
6.5	Gráfica comparativa de la última resistencia a la tensión (σ_m)	61
6.6	Gráfica comparativa de la deformacion a la carga máxima (ε_m) de las diferentes muestras ensayadas	62
6.7	Gráfica comparativa de la zona de deformación homogénea (ε_m-ε_I)	63

6.8	Gráfica comparativa de (σ_1 σ_{max})	64
6.9	Gráfica comparativa del valor n contra la deformación máxima	65
6.10	Zonas donde caen los valores de resistencia última para todas las muestras en la dirección longitudinal	66
6.11	Zonas donde caen los valores de resistencia última para todas las muestras en la dirección a 45°	66
6.12	Zonas donde caen los valores de resistencia última para todos las muesrtas en la dirección transversal	67
6.13	Gráfica de las deformaciones (ε_t)y ε_w) contra el desplazamiento	68
6.14	Gráfica de deformación del espesor contra deformación del ancho	69
6.15	Gráfica de los valores R para la muestra A3 ensayada en la dirección transversal donde se extrapola el valor R_0	70
6.16	Gráfica comparativa de los valores R_0 obtenidos de la extrapolación	71
6.17	Muestra A1, acero con 0.054% de C 400X	74
6.18	Muestra A2, acero con 0.050% de C 400X	75
6.19	Muestra A3, acero con 0.053% de C 400X	75
6.20	Muestra B, acero con 0.64% de C 400X	76
6.21	Muestra A3, acero con 0.053% de C (SEM)	76
6.22	Muestra A3, acero con 0.053% de C (SEM) 1KX	77
6.23	Muestra B, acero con 0.064% de C (SEM) 15KX	77
6.24	Muestra B, acero con 0.064% de C (SEM) 15KX	78
A.1	Ensayos de tensión en la dirección longitudinal A1	84
A.2	Ensayos de tensión en la dirección 45° A1	84
A.3	Ensayos de tensión en la dirección transversal A1	85
A.4	Ensayos de tensión en la dirección longitudinal A1	85
A.5	Ensayos de tensión en la dirección 45° A1	86
A.6	Ensayos de tensión en la dirección transversal A1	86
A.7	Ensayos de tensión en la dirección longitudinal A2	87
A.8	Ensayos de tensión en la dirección 45° A2	87
A.9	Ensayos de tensión en la dirección transversal A2	88
A.10	Ensayos de tensión en la dirección longitudinalA2	88
A.11	Ensayos de tensión en la dirección 45° A2	89
A.12	Ensayos de tensión en la dirección transversal A2	89
A.13	Ensayos de tensión en la dirección longitudinal A3	90
A.14	Ensayos de tensión en la dirección 45° A3	90
A.15	Ensayos de tensión en la dirección transversal A3	91
A.16	Ensayos de tensión en la dirección longitudinal A3	91
A.17	Ensayos de tensión en la dirección 45° A3	92
A.18	Ensayos de tensión en la dirección transversal A3	92
A.19	Ensayos de tensión en la dirección longitudinal B	93
A.20	Ensayos de tensión en la dirección 45° B	93
A.21	Ensayos de tensión en la dirección transversal B	94
A.22	Ensayos de tensión en la dirección longitudinal B	94
A.23	Ensayos de tensión en la dirección 45° B	95
A.24	Ensayos de tensión en la dirección transversal B	95

Resumen autobiográfico

Ana Lilia Delgado Navarrete

Candidata para el Grado de Maestra en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales

Tesis: Anisotropía de cinta de acero de bajo carbono laminada en caliente.

La Ing. Ana Lilia Delgado Navarrete nació en la ciudad de México el 28 de febrero de 1999. Es hija de Luis Delgado Gonzalez y Lilia Navarrete Cejas. Cursó la licenciatura en la Universidad Autónoma Metropolitana y obtuvo el Título de Ingeniero Metalurgista en 1996.

En el mismo año ingresó al Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León con el fin de obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.