

Influencia del tratamiento térmico y del trabajo en frío en el comportamiento mecánico de láminas de acero ASTM A-569

Gennifer Aparicio⁽¹⁾, *Heber D' Armas*⁽²⁾

⁽¹⁾ *Centro de Investigaciones en Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

Email: gaparici@uc.edu.ve

⁽²⁾ *Unidad de Aplicaciones Experimentales, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela.*

Email: hdarmas@usb.ve

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio sobre la influencia de los tratamientos térmicos y el trabajo en frío en el comportamiento de las propiedades mecánicas del acero ASTM A-569, tomando en cuenta la dirección de laminación. La respuesta del acero a las condiciones de trabajo fue medida por medio de ensayos de tracción y estudios de microscopía óptica. Se encontró que el material en su condición original posee mayor resistencia y ductilidad en comparación con el material tratado térmicamente. Por otra parte, el material tanto tratado térmicamente como en estado de entrega presentó mayor resistencia en sentido perpendicular a la dirección de laminación, debido al cambio de dirección del movimiento de dislocaciones asociado al efecto Bauschinger. Para el material trabajado en frío, la diferencia en las propiedades mecánicas, relacionada con la orientación de la laminación, disminuyó con el incremento del trabajo en frío.

Palabras claves: tratamiento térmico, trabajo en frío, dirección de laminación.

Influence of the heat treatment and cold work in the ASTM A-569 steel sheet mechanical behavior

Abstract

We present a study of the influence of heat treatment and cold work on the ASTM A-569 steel sheet mechanical behavior, taking into account the rolling direction. The response of the steel to the work conditions was measured by means of tension tests and optical microscopy studies. The metal in its original condition had better strength and ductility properties in comparison to the material with heat treatment. On the other hand, the material with heat treatment and in its original condition had greater yield and ultimate stresses when measured perpendicularly to the rolling direction, which was attributed to the change in the direction of movement of dislocations, associated to the Bauschinger effect. For the cold worked material, the difference in the mechanical properties associated to the rolling direction decreased with the increase of the amount of cold work.

Keywords: heat treatment, cold work, rolling direction.

1. INTRODUCCIÓN

Los aceros al carbono son aquellos en los cuales el carbono es el elemento aleante que controla en forma esencial las propiedades de las aleaciones y en los cuales la cantidad de manganeso no puede exceder de 1,654% y el contenido de cobre y de silicio deben ser cada uno menores a 0,6% [1].

Específicamente los aceros que se encuentran en la clasificación ASTM A-569 son provenientes de láminas o tiras laminadas en caliente y que se encuentran comercialmente disponibles en las designaciones de "aceros comerciales" CS tipos A, B y C y los "aceros para formado" denominados DS y de tipos A, B y C y tienen grado SAE 1006, 1008, 1010 [2]. Esta especificación estándar fue recientemente sustituida por la ASTM A-1011 la cual además incluye aceros de baja aleación y

alta resistencia mejorados en la formabilidad del material [3].

Las aplicaciones típicas son: partes para automóviles, fabricación de rieles de ferrocarril, tubos de acero para conducción de fluidos, andamiaje y herrería, elaboración de tanques y contenedores y una de sus principales aplicaciones, que es servir como base para la fabricación de mallas de metal expandido.

La resistencia a fluencia de estos aceros está en el rango de 205-340 MPa (20-34 Kg/mm²) y la elongación en 50 mm es superior al 25%. La composición química teórica según la norma ASTM A-1011 se muestra en la tabla 1.

Debido a sus aplicaciones, es necesario determinar si existen mejoras en las propiedades mecánicas al aplicar tratamientos térmicos y sobre todo el efecto producido por el trabajo en frío.

El material estudiado fue una lámina de acero ASTM A-569 fabricada por laminado en caliente y con un contenido de carbono máximo de 0,15% utilizada para la fabricación de metal expandido. Las dimensiones de la lámina según fue suministrada se muestran la Figura 1.

Se realizó un Análisis Químico por Chispa utilizando un Espectrómetro de Emisión marca Spectro® modelo SpectroLab1V y los resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 1. Composición química teórica de aceros ASTM A-569, según norma ASTM A-1011

Composición (wt%)	Valor Teórico
C	0,020-0,150
Mn	0,600 (máx)
P	0,035 (máx)
S	0,035 (máx)
Cu	0,200 (mín)

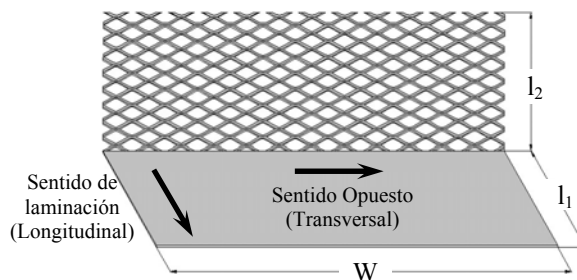


Figura 1. Dimensiones de la lámina utilizada: l_1 y $l_2 = 850$ mm, $w = 1200$ mm y espesor de 4,75 mm

Tabla 2. Composición química del acero ASTM A-569

Elemento Aleante wt(%)	Valor Teórico	Valor Real
C	0,020 – 0,150	0,0972
Mn	0,600 (máx)	0,4818
P	0,035 (máx)	0,0062
S	0,035 (máx)	0,0042
Cu	0,200 (mín)	0,0228

2. METODOLOGÍA

Los ensayos de tracción fueron realizados a probetas obtenidas, con diferentes orientaciones, de la lámina lisa del metal base. Se hicieron cortes para obtener dos rectángulos de 140mm x 300mm, uno en sentido longitudinal (L) y otro en sentido transversal (T) a la dirección de laminación (Figura 1). De estos cortes rectangulares se obtuvieron 18 láminas de 25 x 140 mm, 9 en sentido longitudinal y 9 en sentido transversal, para obtener las probetas en estado de entrega y las que posteriormente se les aplicaría tratamiento térmico. Estas láminas fueron mecanizadas por ambos bordes longitudinales para llevarlas a un ancho específico de 20 mm garantizando un mínimo efecto del corte con plasma en los bordes de las mismas. Posteriormente estas láminas fueron mecanizadas y se obtuvieron 18 probetas según la norma ASTM E8(M) [4], probeta tipo “sheet” de 100 mm de longitud, según la Figura 2.

Posteriormente 12 de estas probetas fueron tratadas térmicamente colocándose en un Horno de Resistencia Eléctrica marca Lindberg® modelo 11-SC-10188-25A a una temperatura promedio de 920°C durante 1 hora. Una vez realizado el tratamiento en el horno, se procedió a retirar 6 probetas para enfriamiento a temperatura ambiente (Normalizado), dejando las

probetas recocidas dentro del horno para disminuir la velocidad de enfriamiento (aproximadamente 24h).

Para realizar las probetas trabajadas en frío se tomaron diferentes cortes del material, los cuales fueron sometidos a un proceso de laminación en frío en una Laminadora marca Stanat® modelo TA.315.5X8. Luego fueron mecanizadas 8 muestras, cuatro de ellas en la dirección de laminación y las restantes perpendicular a la dirección de laminación, según el ejemplo de la Figura 3. Los porcentajes de trabajo en frío aplicados fueron de 10%, 20%, 40% y 60%, utilizando una probeta por cada orientación y para cada porcentaje de trabajo en frío.

Una vez aplicado el trabajo en frío correspondiente a cada una de las probetas, se procedió a mecanizarlas para obtener las probetas de tracción según la norma ASTM E-8M (Figura 3). El total de muestras obtenidas fue veintiséis (26), distribuidas según lo indicado en la tabla 3.

Para analizar la microestructura, fueron obtenidos cortes de cada una de las láminas utilizadas para obtener las probetas R, N, E.E y T.F y estos cortes fueron embutidos en bakelita, lo cuales posteriormente fueron preparados metalográficamente y atacados con Nital al 4% según la norma ASTM E-3-01[5]. Luego fueron analizadas en un microscopio óptico y se obtuvieron micrografías para cada condición a 200X.

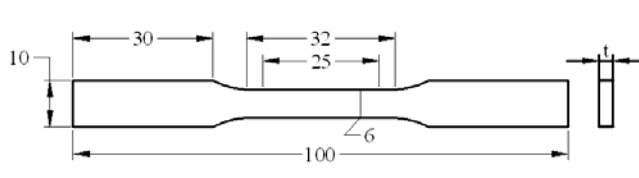


Figura 2. Especificaciones para la probeta plana de tracción con medidas en milímetros.

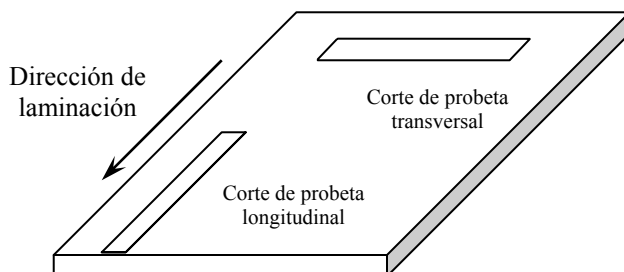


Figura 3. Cortes para elaboración de muestras según la dirección de laminación.

Tabla 3. Distribución de probetas

Orientación		Longitudinal (L)	Transversal (T)
Trabajo en frío (%T.F)	10	1	1
	20	1	1
	40	1	1
	60	1	1
Estado de entrega (E.E)		3	3
Recocido (R)		3	3
Normalizado (N)		3	3

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Efectos del Tratamiento Térmico.

En las Tabla 4 se muestran las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos de tracción realizados al acero ASTM A-569, en función del tratamiento térmico aplicado. Se obtuvo como propiedades, la resistencia a la fluencia (S_y), resistencia última (S_u), módulo de elasticidad (E) y la deformación última (e_u) y estas

propiedades se encuentran tabuladas en la tabla 4 y son el resultado de promediar los datos obtenidos de tres ensayos para cada condición.

Las Figuras 4 y 5 muestran la comparación entre las curvas esfuerzo-deformación del acero ASTM A-569 en función del tratamiento térmico, partiendo de la condición de estado de entrega del material y en función de la orientación.

Tabla 4. Propiedades mecánicas del material tratado térmicamente y en estado de entrega

Prop.	R		N		E.E	
	L	T	L	T	L	T
S_y	10,6	12,7	27,2	17,5	27,0	28,8
S_u	23,5	25,9	33,5	37,1	38,9	38,2
E	15754	18546	17873	15072	23192	19164
e_u	0,2250	0,2431	0,2399	0,2193	0,2013	0,2153

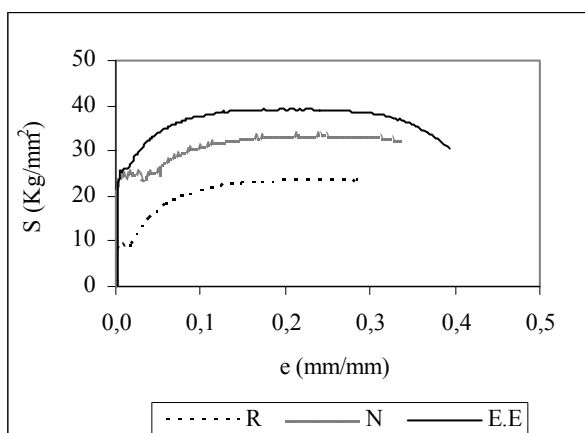


Figura 4. Comparación del material en estado de entrega y tratado térmicamente. Orientación longitudinal.

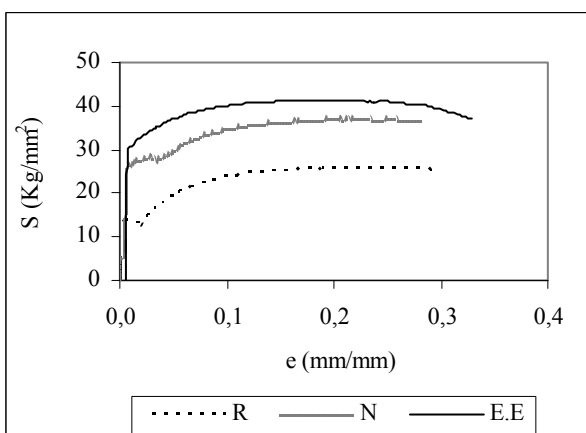


Figura 5. Comparación del material en estado de entrega y tratado térmicamente. Orientación transversal.

En las Figuras 4 y 5 y en la Tabla 4 puede verse que el material en estado de entrega posee mayor resistencia mecánica y mayor ductilidad que el material en estado de recocido y normalizado, tanto en la dirección longitudinal como en la transversal, presentado en general mayor tenacidad.

Por otra parte, puede observarse claramente que el material en estado de entrega presenta una pequeña cantidad de trabajo en frío, debido a que la zona de fluencia prácticamente no se presenta, lo cual puede detallarse en las microestructuras de la Figura 6, donde se compara la microestructura del material, en función del tratamiento térmico aplicado partiendo del material en condiciones de entrega. Como puede verse el material recocido es de grano grueso, debido a la baja velocidad de enfriamiento, y equiaxial lo cual le confiere baja resistencia mecánica y alta ductilidad, mientras que el material normalizado presenta grano mas fino. En contraste, el material en estado de entrega presenta granos finos pero no equiaxiales, con una forma alargada, lo cual evidencia deformación plástica previa. En general el material en condiciones de entrega presenta la mejores propiedades mecánicas, tanto en resistencia como en ductilidad, lo cual evidencia su aplicación en procesos de conformado.

La mejora en las propiedades mecánicas en el estado de entrega es generada debido al proceso de conformado de la lámina original, las cuales se fabrican por laminación en caliente. Durante este proceso existen gradientes de temperatura que proporcionan al material cambios microestructurales y en consiguiente no homogeneidad en el material. Por otra parte, Las fases que

se observan en la microestructura para este acero del tipo hipoeutectoide, son ferrita en mayor proporción, debido al bajo porcentaje de carbono (0,09% aproximadamente) y perlita.

En las Figuras 7 a 9 se presenta una comparación entre las curvas esfuerzo-deformación del material tratado térmicamente y en estado de entrega en función de la orientación.

Como puede verse el material recocido es de grano grueso, debido a la baja velocidad de enfriamiento, y equiaxial lo cual le confiere baja resistencia mecánica y alta ductilidad, mientras que el material normalizado presenta grano mas fino. En contraste, el material en estado de entrega presenta granos finos pero no equiaxiales, con una forma alargada, lo cual evidencia deformación plástica previa. En general el material en condiciones de entrega presenta la mejores propiedades mecánicas, tanto en resistencia como en ductilidad, lo cual evidencia su aplicación en procesos de conformado.

La mejora en las propiedades mecánicas en el estado de entrega es generada debido al proceso de conformado de la lámina original, las cuales se fabrican por laminación en caliente. Durante este proceso existen gradientes de temperatura que proporcionan al material cambios microestructurales y en consiguiente no homogeneidad en el material. Por otra parte, Las fases que se observan en la microestructura para este acero del tipo hipoeutectoide, son ferrita en mayor proporción, debido al bajo porcentaje de carbono (0,09% aproximadamente) y perlita.

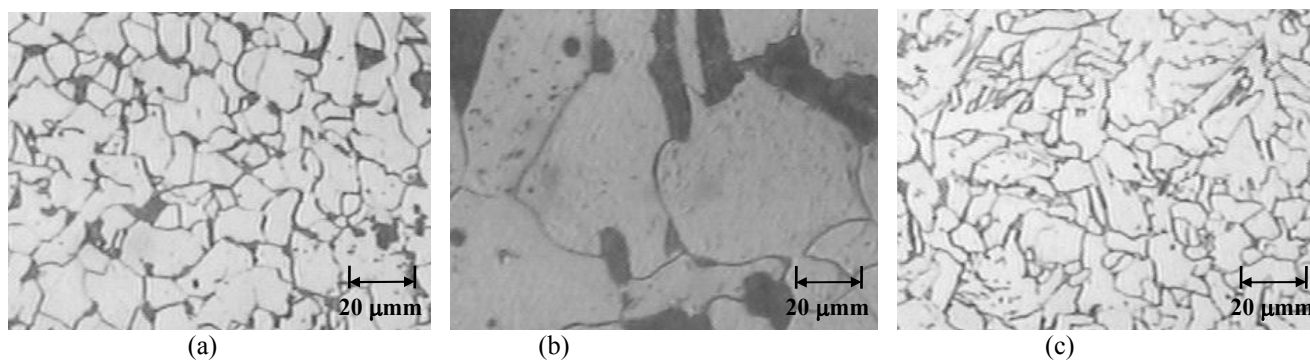


Figura 6. Microestructura del Acero ASTM A-569 a 200X: (a) Estado de entrega (b) Recocido (c) Normalizado

Como puede verse el material recocido es de grano grueso, debido a la baja velocidad de enfriamiento, y equiaxial lo cual le confiere baja resistencia mecánica y alta ductilidad, mientras que el material normalizado presenta grano mas fino. En contraste, el material en estado de entrega presenta granos finos pero no equiaxiales, con una forma alargada, lo cual evidencia deformación plástica previa. En general el material en condiciones de entrega presenta la mejores propiedades mecánicas, tanto en resistencia como en ductilidad, lo cual evidencia su aplicación en procesos de conformado.

La mejora en las propiedades mecánicas en el estado de entrega es generada debido al proceso de

conformado de la lámina original, las cuales se fabrican por laminación en caliente. Durante este proceso existen gradientes de temperatura que proporcionan al material cambios microestructurales y en consiguiente no homogeneidad en el material. Por otra parte, Las fases que se observan en la microestructura para este acero del tipo hipoeutectoide, son ferrita en mayor proporción, debido al bajo porcentaje de carbono (0,09% aproximadamente) y perlita.

En las Figuras 7 a 9 se presenta una comparación entre las curvas esfuerzo-deformación del material tratado térmicamente y en estado de entrega en función de la orientación.

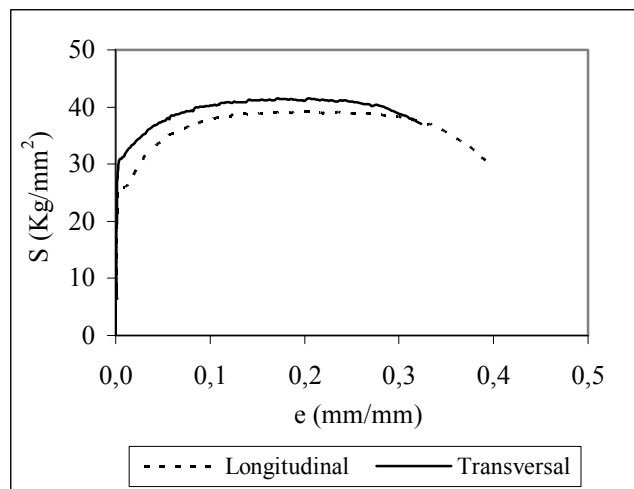


Figura 7. Curvas esfuerzo-deformación del material en estado de entrega en función de la orientación.

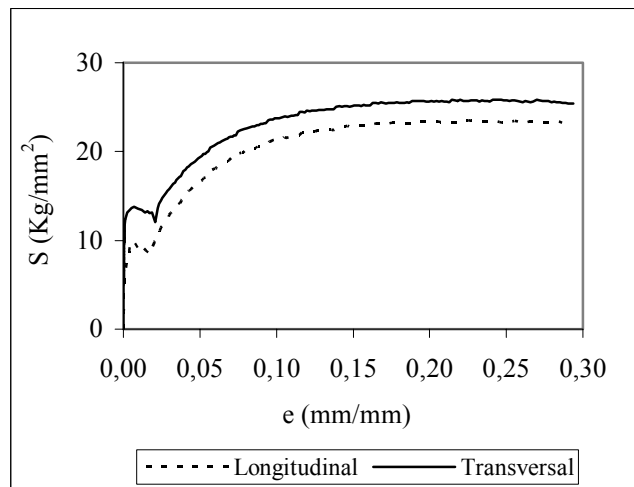


Figura 8. Curvas esfuerzo-deformación del material recocido en función de la orientación.

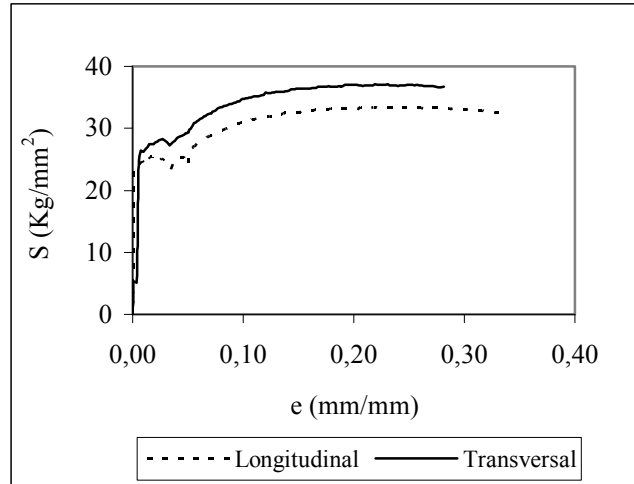


Figura 9. Curvas esfuerzo-deformación del material normalizado en función de la orientación

En general puede observarse en las Figuras anteriores que para el material tratado térmicamente y en estado de entrega, que la evaluación según la orientación de laminación arroja mayores valores de resistencia en el sentido transversal. Este aumento en las propiedades en el sentido transversal con respecto al longitudinal puede deberse a la inversión en la dirección de movimiento de las dislocaciones, al cambiar la dirección de deformación, debido a que cuando se realiza el ensayo en sentido transversal, la deformación es aplicada en sentido perpendicularmente opuesto al sentido de laminación, lo que puede generar que las dislocaciones se queden apiladas aumentando la resistencia.

Este efecto puede estar asociado al efecto Bauschinger, ya que al cambiar el sentido de la deformación, también se cambia el sentido de movimiento de las dislocaciones. De esta manera cuando se lamina el material las dislocaciones se mueven preferencialmente en dirección a la solicitud externa y luego al traccionar en sentido perpendicular se cambia la dirección de dicho movimiento, lo cual

acarrea cierto grado de anisotropía en el campo de dislocaciones [6].

3.2 Efecto del Trabajo en Frío

En tabla 4 se muestran las propiedades mecánicas en función del porcentaje de trabajo en frío, y en la Figura 10 se muestra gráficamente la comparación entre las propiedades y función del trabajo en frío.

Se observa como era de esperarse, el incremento de la resistencia con el porcentaje de trabajo en frío y la disminución de la ductilidad, lo cual se ve reflejado en la disminución de la deformación última. En las microestructuras de la Figura 11 se observa como cambia el grano, partiendo del material original, a medida que se incrementa el trabajo en frío, partiendo de un grano con poca deformación y alargamiento y posteriormente se observa un alargamiento gradual del grano, lo cual se ve reflejado en las propiedades mecánicas como puede observarse en las Figuras 12 y 13. Sólo se muestra el caso longitudinal debido a que el comportamiento en sentido transversal es similar.

Tabla 5. Propiedades mecánicas del material trabajado en frío en función de la orientación

Propiedades	10% T.F		20% T.F		40% T.F		60% T.F	
	L	T	L	T	L	T	L	T
S_v	40,6	47,5	57,5	64,2	39,4	42,7	60,1	62,4
S_u	42,9	52,3	60,1	66,5	40,7	44,2	61,4	65,2
E	18749	15883	18402	16635	25100	15395	9621	16656
e_u	0,0290	0,0133	0,0120	0,0095	0,0205	0,0109	0,0112	0,0123

Se observa como era de esperarse, el incremento de la resistencia con el porcentaje de trabajo en frío y la disminución de la ductilidad, lo cual se ve reflejado en la disminución de la deformación última. En las microestructuras de la Figura 11 se observa como cambia el grano, partiendo del material original, a medida que se incrementa el trabajo en frío, partiendo de un grano con

poca deformación y alargamiento y posteriormente se observa un alargamiento gradual del grano, lo cual se ve reflejado en las propiedades mecánicas como puede observarse en las Figuras 12 y 13. Sólo se muestra el caso longitudinal debido a que el comportamiento en sentido transversal es similar.

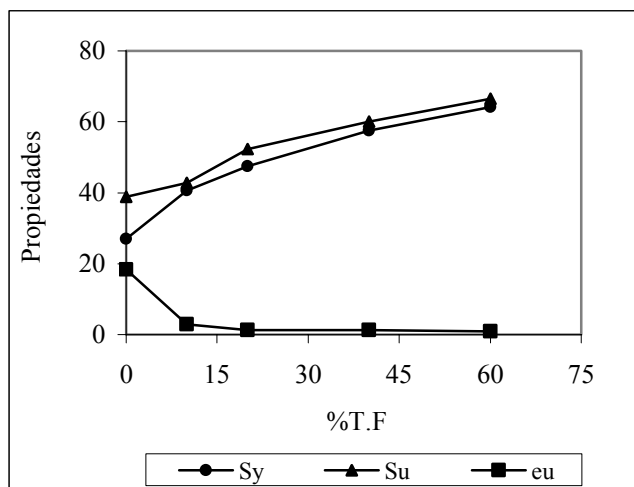


Figura 10. Propiedades vs. Porcentaje de trabajo en frío para el acero ASTM A569 en orientación longitudinal

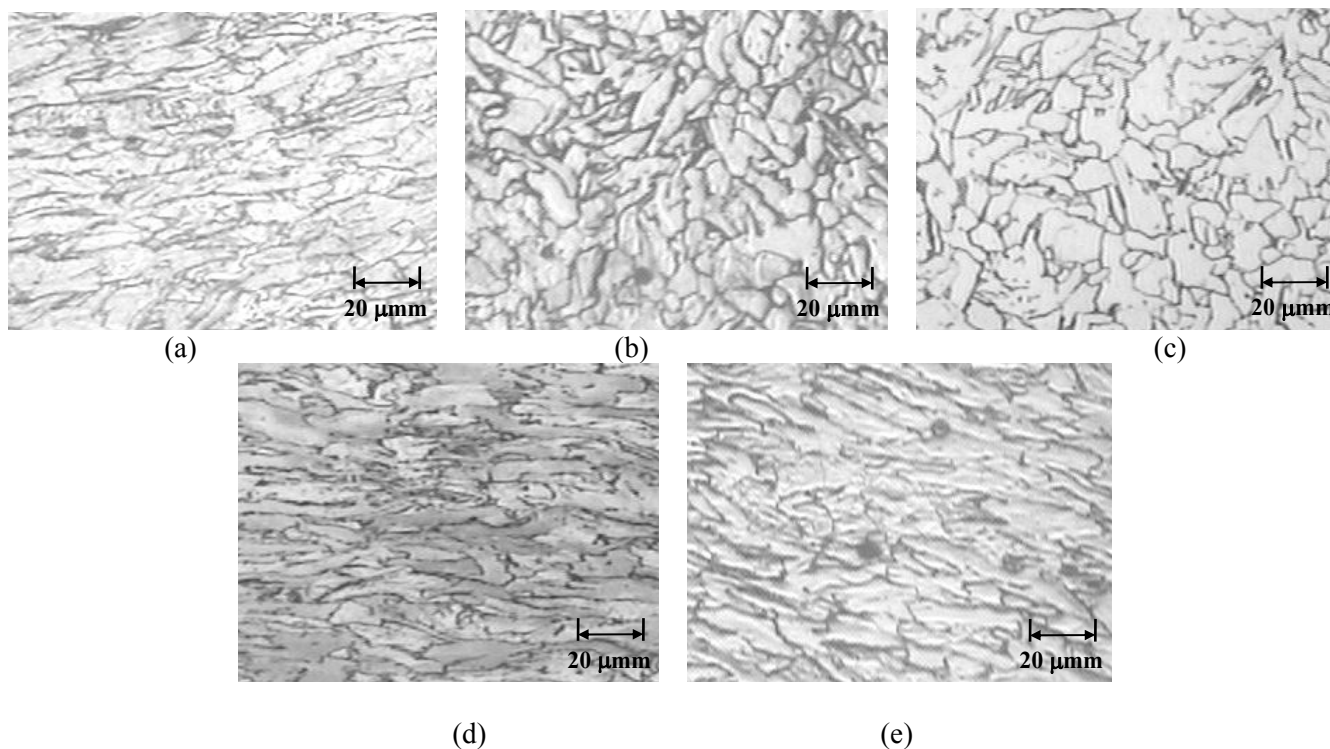


Figura 11. Microestructura del Acero ASTM A569 con trabajo en frío a 200X. (a) Estado de entrega. (b) 10% T.F. (c) 20% T.F. (d) 40% T.F. (e) 60% T.F.

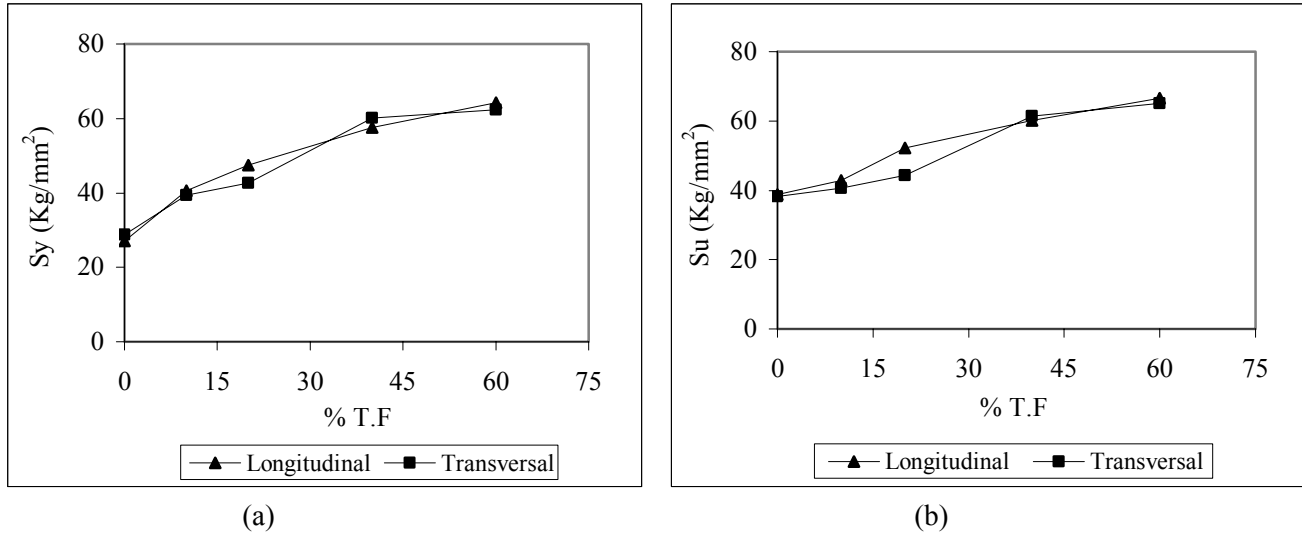


Figura 12. Resistencia en función del trabajo en frío. (a) S_y . (b) S_u .

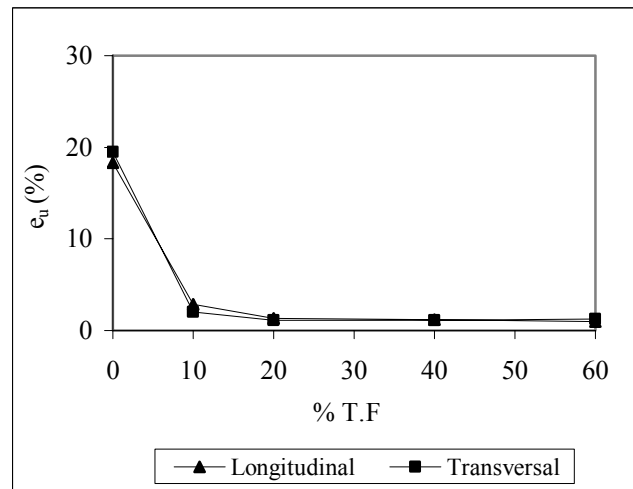


Figura 13. Deformación última en función del trabajo en frío

Por otra parte, es posible estimar el rango en que se encuentra el porcentaje de trabajo en frío que presenta el material original. Comparando la microestructura para 10% T.F. contra el material en estado de entrega y las propiedades mecánicas de las tablas 4 y 5, se podría decir que el porcentaje de deformación previa que posee el acero es inferior al 10% debido a que el grano es mas equiaxial que para la microestructura del material con 10% T.F. (Figura 11(b)) y el valor de las resistencia de fluencia y última está entre los valores del material recocido y el material con 10% T.F.

Respecto a la orientación, existe poca diferencia en las propiedades mecánicas en el sentido longitudinal y transversal y a medida que se incrementa el trabajo en frío esta diferencia tiende a

disminuir, con una diferencia promedio en del 4% en S_u , del 1% en S_y y 4% en e_u .

4. CONCLUSIONES

El Acero ASTM A – 569 estudiado en estado de entrega posee mayor resistencia y ductilidad en comparación con el material tratado térmicamente, tanto en la dirección longitudinal como en la transversal, por lo cual se dice que los tratamientos térmicos aplicados al material no generan ninguna mejora en el mismo.

Comparando las microestructura para 10% C T.F. contra el material en estado de entrega y las propiedades mecánicas, se puede decir que el porcentaje de deformación previa que posee el acero en condiciones de entrega es inferior al 10% C.W.

El aumento en las propiedades en el sentido transversal con respecto al longitudinal es generado por la inversión en la dirección de movimiento de las dislocaciones, lo cual puede estar asociado al efecto Bauschinger, ya que al cambiar el sentido de la deformación, también se cambia el sentido de movimiento de las dislocaciones.

La diferencia en las propiedades mecánicas del acero ASTM A-569 con respecto a la orientación disminuye a medida que se aumenta el porcentaje de trabajo en frío.

5. AGRADECIMIENTOS

Los agradecimientos son dirigidos al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo, por subvencionar esta investigación a través de la Investigación Menor CDCH 2100-2004 y a la empresa MABOCA C.A quien suministró el acero estudiado.

6. REFERENCIAS

- [1] Sánchez R. (2005): “Determinación de las Propiedades Mecánicas de Láminas de Metal Expandido”, 7º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, México D.F.
- [2] ASTM A-569.(1991): “American Society for Testing and Material Standard Specification Steel, Carbon (0,15 Maximum, Percent), Hot – Rolled, Sheet and Strip Commercial Quality”.
- [3] ASTM A 1011/A 1011M – 01^a. (2001): “Standard Specification for Steel, Sheet and Strip, Hot-Rolled, Carbon, Structural, High-Strength Low-Alloy and High-Strength Low-Alloy with Improved Formability”.
- [4] ASTM E – 8M – 01. (2001): “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]”.
- [5] ASTM E – 3 – 01. (2001): American Society for Testing and Material Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.
- [6] Tozawa, Y. (1978): “Plastic Deformation Behavior under Conditions of Combined Stress”, Symposium of Mechanics of Sheet Metal Forming, pp. 81-109.