

Evaluación de la anisotropía en las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304 laminado en frío

Juán C. Pereira F.^{*,a}, Mary Torres^b, Vicente Amigo^c, Jenny Zambrano^d

^aCentro de Investigaciones en Mecánica – CIMEC, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

^bDepartamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

^cInstituto de Tecnología de Materiales, Universidad Politécnica de Valencia ITM-UPV, España.

^dDpto. de Materiales y Procesos de Fabricación, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Resumen.-

La anisotropía es el término usado en los materiales metálicos para describir la diferencia que existe entre las propiedades mecánicas de acuerdo a la dirección en las cuales fueron evaluadas. En este trabajo se analizó la anisotropía del acero inoxidable austenítico AISI 304 en estado de entrega y laminado en frío, tomando en cuenta tres orientaciones en el plano de laminación con respecto al sentido de laminación (paralela, diagonal y perpendicular). Para cada condición, se observó anisotropía en las propiedades mecánicas, obteniendo la mayor magnitud para la resistencia a tracción y resistencia a fluencia, así como, el menor alargamiento en la orientación transversal. Para el material en estado de entrega se observó una ligera anisotropía, y ésta se incrementa al deformarlo en frío, siendo mayor para el mayor porcentaje de deformación alcanzado. La textura cristalográfica del material laminado en frío, evaluada mediante EBSD reveló, una textura de fibra predominante en $\langle 111 \rangle$ paralela a la dirección transversal, y en $\langle 111 \rangle$ paralela al sentido de laminación, siendo de mayor evolución e intensidad en sentido transversal.

Palabras clave: Anisotropía, ensayo de tracción, AISI 304, laminación en frío.

Anisotropy evaluation of the mechanical properties on Cold Rolled AISI 304 stainless steel

Abstract.-

The anisotropy is the term used in metallic materials to describe the difference between the mechanical properties according to the direction in which they were evaluated. In this study we determined the variation of the mechanical properties of AISI 304 austenitic stainless steel in annealing state and cold rolled in several passes. Three orientations in the rolling plane with respect to the rolling direction (parallel, diagonal and perpendicular) were evaluated. For each study condition anisotropy in the mechanical properties was observed. The bigger tensile strength and yield strength, and the lower total elongation were obtained for the transverse orientation. For the material in annealing state, a slight anisotropy was observed, and it increases by cold rolling deformation. The anisotropy being greater in magnitude, for the greatest percentage of cold deformation reached. The crystallographic texture of cold rolled material, evaluated by EBSD revealed a predominant fiber texture $\langle 111 \rangle$ parallel to the transverse direction, and $\langle 111 \rangle$ parallel to the rolling direction, with mayor evolution and intensity in the transverse direction.

Keywords: Anisotropy, tensile test, AISI 304, cold rolled.

Recibido: octubre 2011

*Autor para correspondencia

Correo-e: jpereira@uc.edu.ve;

www.ing.uc.edu.ve/jpereira (Juán C. Pereira F.)

Aceptado: abril 2012

1. Introducción

Dentro de los aceros inoxidables austeníticos se encuentra el AISI/SAE 304, siendo una importante aleación de ingeniería usada en muchas aplicaciones y ambientes. Esta familia de aceros es ampliamente utilizada en aplicaciones donde se requiere combinación de alta resistencia a la corrosión, a la conformabilidad, y a la soldabilidad [1], es decir, en la industria química, naval, farmacéutica, aeronáutica, alimenticia, de transporte, construcción civil, usos en arquitectura, etc. Las piezas y componentes utilizados en equipos y máquinas en estas industrias, generalmente son fabricadas utilizando procesos de conformado. Estos procesos causan deformación plástica en los materiales metálicos, originando una textura y orientación de los granos particular.

La anisotropía de orientación es el término usado particularmente en los materiales metálicos para describir la diferencia que existe, entre las propiedades mecánicas de acuerdo a la dirección en las cuales fueron determinadas en el material. En los metales, la más importante causa de anisotropía en las propiedades mecánicas es la orientación de los granos (por ejemplo la tendencia estadística para ciertas orientaciones cristalográficas), también influye las orientaciones preferentes o textura cristalográfica causada en el metal deformado previamente [2]. La deformación plástica mediante procesos de conformado y la recrystalización en la microestructura cristalográfica, generan una textura cristalográfica en los materiales policristalinos, de acuerdo a su estructura cristalina particular [3]. En este caso, los materiales que han sido deformados mediante procesos de laminación en frío presentan texturas cristalográficas que permiten relacionar las propiedades mecánicas con la orientación.

2. Antecedentes

Diversos trabajos han sido publicados acerca de la anisotropía en materiales metálicos, Hutchinson W. [4] determinó la influencia de la anisotropía

en el comportamiento a tracción en el acero inoxidable dúplex UNS S31803 laminado en frío. Se estudiaron seis orientaciones en el plano de laminación, desde 0° hasta 90° con respecto al sentido de laminación; se reportó que la elongación se incrementa desde una orientación de 0° hasta 45° y luego disminuye de 45° hasta 90° del sentido de laminación, la resistencia a la fluencia y la resistencia última disminuye desde una orientación de 0° hasta 45° y luego se incrementa desde 45° hasta 90° del sentido de laminación, obteniéndose la mayor resistencia a la fluencia y a la tensión en la orientación transversal al sentido de laminación (90°). Hill R. [5] formuló un tratamiento cuantitativo para la anisotropía plástica de los metales sin considerar el origen cristalográfico. Utilizó un material homogéneo, caracterizado por tres ejes ortogonales de anisotropía y propuso un criterio de fluencia de acuerdo al estado de esfuerzos y seis constantes, las cuales caracterizan la anisotropía en el material; tres de esas constantes pueden ser evaluadas con un ensayo de tracción simple, y las otras tres con un ensayo de corte. También propuso un factor de proporción entre la deformación plástica transversal (en el ancho) y la deformación plástica en el espesor.

Song J. et al, [6] estudió la anisotropía plástica del acero inoxidable dúplex SAF2304 laminado en frío, basándose en ensayos de tracción en tres diferentes orientaciones en el plano de laminación y con respecto al sentido de laminación previo. También realizaron metalografías y determinación de textura cristalográfica. La muestra con orientación perpendicular al sentido de laminación presentó una resistencia a la tracción mayor, mientras que la muestra cuya orientación es diagonal con respecto al sentido de laminación presentó la menor resistencia a la tracción. Mateo A. et al, [7] estudió los efectos de la anisotropía en el comportamiento a tracción y a fatiga de un acero dúplex laminado. Se obtuvo que las muestras con orientación transversal, presentan mayor resistencia y menor elongación, mientras que las muestras tomadas en orientación diagonal (45°) al sentido de laminación previo, presentan la menor resistencia a la tracción y el mayor

porcentaje de elongación de las orientaciones estudiadas. Estas dos investigaciones precedentes son congruentes, en cuanto a la influencia que tiene la anisotropía en las propiedades mecánicas en los aceros inoxidables dúplex.

3. Metodología

3.1. Material y Composición química

El material utilizado es un acero inoxidable austenítico AISI 304 en lámina de 6 mm de espesor. Fabricado por Acesita–Arcelor en la planta de Belo Horizonte en Brasil, y el estado de entrega es con un recocido blando realizado a una temperatura de 1037.8 °C. Las propiedades mecánicas reportadas indican una resistencia a la fluencia de 348 MPa, una resistencia máxima de 690 MPa, un porcentaje de alargamiento de 58 %, un tamaño de grano ASTM 8 y una dureza de 87 HBN. Para verificar los requerimientos de composición química del material se realizó la determinación de la misma, empleando la técnica de espectrofotometría de emisión óptica mediante un espectrofotómetro marca Spectro. Se realizaron cinco mediciones en la superficie de una muestra de la lámina. La Tabla 1 muestra el porcentaje en peso promedio de cada uno de los componentes que constituyen la aleación y su desviación estándar.

3.2. Laminación en frío

Las tiras cortadas a partir de láminas de 6 mm de espesor, con ancho de 200 mm y longitud de 450 mm se laminaron en frío utilizando un laminador mecánico marca Stanat modelo TA–315 provisto de dos rodillos cilíndricos con diámetros de 152 mm y potencia máxima de 15 HP, la laminación se realizó con una velocidad constante de 5 pie/min. Para alcanzar los grados de deformación requeridos en este estudio se requirió de varias pasadas de laminación, a la primera lámina se le realizaron tres pases de laminación, hasta un espesor final de 4,94 mm (porcentaje de reducción de espesor de 18,3%), mientras que en la segunda lámina se realizaron seis pases de laminación y espesor final de 4,01 mm (porcentaje de reducción de espesor: 33,7%).

3.3. Caracterización microestructural y medición de dureza

Para la caracterización microestructural se obtuvieron fotomicrografías digitales mediante microscopía óptica. Se prepararon las muestras mediante desbaste grueso y fino con papel abrasivo, de acuerdo a la norma ASTM E3 [8]. Luego se procedió a pulir las muestras con una pulidora Metalográfica, utilizando un paño tipo billar con alúmina de 1 μm en suspensión acuosa, y se procedió a pulir con paño tipo microcloth y alúmina de 0.05 μm . El ataque electrolítico con ácido oxálico al 10%, 6V y 0,9A por 65s reveló la microestructura. Para la medición de dureza se tomaron muestras de las láminas, y se procedió a preparar la superficie y realizar el ensayo de acuerdo a las recomendaciones de la norma ASTM E18 [9], para medición de dureza Rockwell en materiales metálicos. El equipo utilizado fue un durómetro digital marca Buehler modelo Macromet 5100T utilizando una escala Rockwel A.

3.4. Ensayos de tracción uniaxial

Para determinar las propiedades mecánicas del material en estado de entrega y laminado en frío, se procedió a mecanizar mediante corte por chorro de agua abrasivo, muestras estandarizadas para ensayos de tracción de acuerdo a ASTM E8M [10]. De cada lámina deformada con diferente porcentaje de reducción de espesor, se mecanizaron dieciocho probetas, distribuidas en: seis probetas para cada orientación en estudio (longitudinal: 0°, diagonal: 45° y transversal: 90°) con respecto al sentido de laminación previo y en el plano de laminación. Esto hace que, considerando los ensayos de tracción del material en estado de entrega se tenga un total de cuarenta y ocho (48) probetas. Las probetas fueron sometidas a un ensayo de tracción uniaxial en una máquina universal de ensayo de materiales marca MTS modelo 810 con una capacidad de 25 ton, se empleó un extensómetro uniaxial marca Instron modelo 2630–113, con apreciación de 0,001 mm y longitud calibrada de 50 mm, se empleó una velocidad constante de 5 mm/min. Los datos de los ensayos fueron tomados con una velocidad

Tabla 1: Composición química (% en peso) medida en la lámina de Acero Inoxidable AISI 304

Medición	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Co	V	W	Fe
											Balance
Promedio	0,082	1,070	0,476	17,946	8,298	0,097	0,102	0,087	0,026	0,048	71,765
Des. Estándar	0,007	0,011	0,008	0,094	0,033	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,088

de muestreo de 90 datos/min, reportados por el software MTS FlexTest.

3.5. Determinación de la textura cristalográfica del material

Para caracterizar la textura cristalográfica de las muestras se utilizó la técnica de Difracción de Electrones Retrodispersados (EBSD), empleando un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 6300, equipado con detectores de electrones secundarios y de electrones retrodispersados (BSE), así como un sistema de microanálisis por dispersión de energía (EDX) Oxford Inca y cámara de infrarrojos con sistema EBSD. Las muestras fueron preparadas de acuerdo a lo detallado en la caracterización microestructural, pero agregando pulido final empleando solución de Sílica Coloidal de $0.05 \mu\text{m}$ (OP-S), limpiando las muestras en limpiador ultrasónico con solución jabonosa.

4. Resultados



Figura 1: Fotomicrografías en estado de entrega



Figura 2: Fotomicrografías en laminado en frío 18,3 %

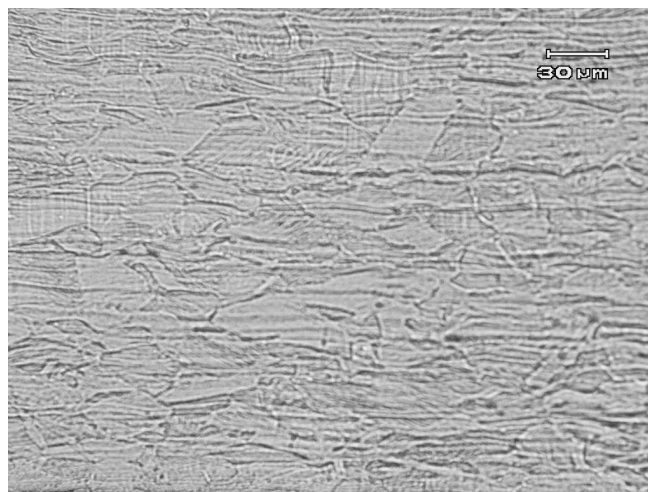


Figura 3: Fotomicrografías en laminado en frío 33,7 %

Las microestructuras del acero AISI 304 en estado de entrega, laminado en frío con porcentajes de reducción de espesor del 18,3 % y del 33,7 % se muestran en las fotomicrografías en el plano longitudinal del Acero AISI 304 a 200X de las Figuras 1, 2 y 3. Aunque se realizaron para la superficie, plano transversal y plano longitudinal

de la lámina, se muestran y analizan las obtenidas en el plano longitudinal debido a que muestran mayor información de la microestructura.

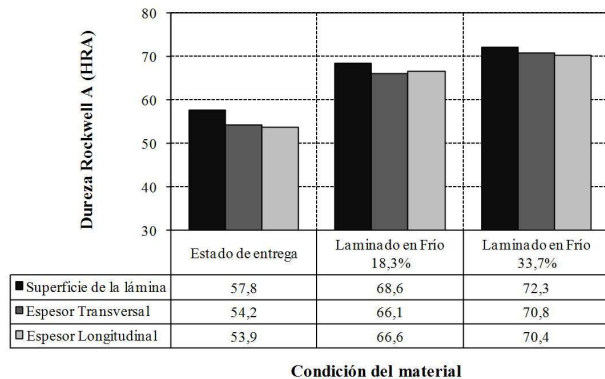


Figura 4: Comportamiento de la dureza medida en el acero AISI 304

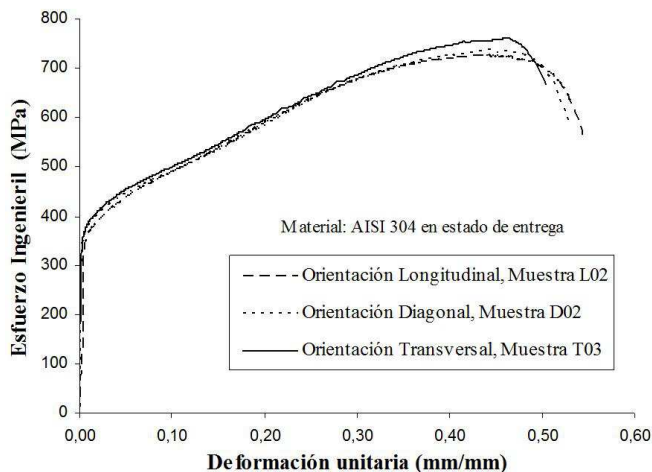


Figura 5: Curvas Esfuerzo–Deformación en tracción del Acero AISI 304 en estado de entrega

La dureza medida en estado de entrega arrojó valores de dureza similares a los reportados en certificado de calidad del material, siendo la dureza reportada 87 HRB (53,9 HRA). La dureza promedio obtenida se muestra en la Figura 4. A partir de los datos obtenidos del ensayo de tracción uniaxial de las muestras, se obtuvieron las curvas ingenieriles de esfuerzo – deformación, para tres orientaciones estudiadas. Las Figuras 5, 6 y 7 muestran el comportamiento típico a tracción obtenido para las diferentes condiciones de estudio.

La Figura 8 muestra los mapas de orientación cristalina mediante figuras de polo inversas, co-

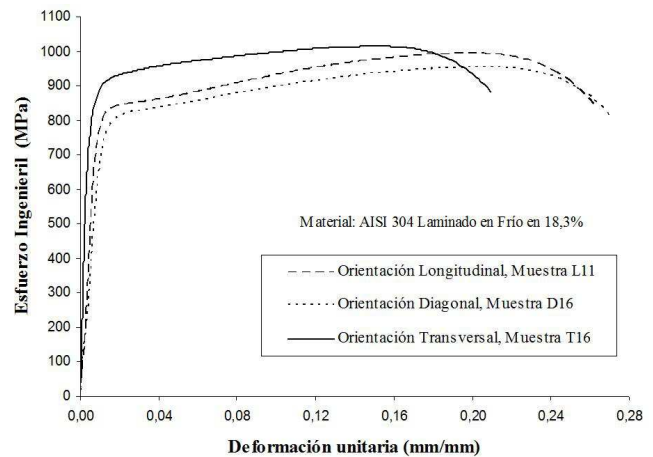


Figura 6: Curvas Esfuerzo–Deformación en tracción del Acero AISI 304 en laminado en frío 18.3 %

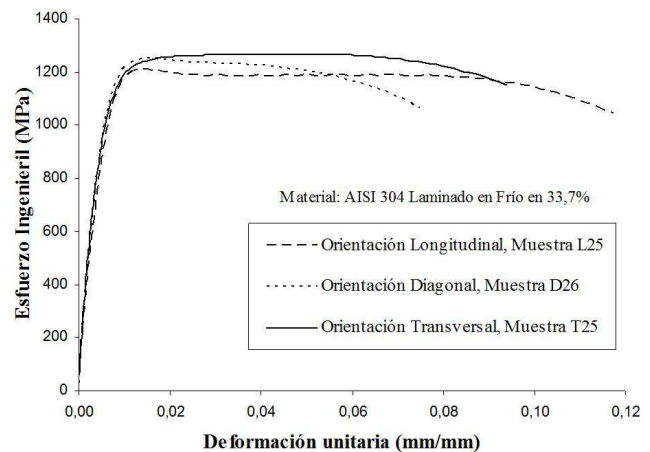


Figura 7: Curvas Esfuerzo–Deformación en tracción del Acero AISI 304 en laminado en frío 33.7 %

respondientes a una zona ubicada a un cuarto del espesor, entre el centro y la superficie, en un plano paralelo al de laminación, de una muestra para cada condición de estudio.

5. Discusión de resultados

La microestructura del material en estado de entrega (Figura 1) revela una estructura de granos poligonales. No se observan granos alargados; se visualizan maclas y el borde oscuro y definido de los granos, se observan adicionalmente bandas de deformación, representadas por líneas ligeramente oscuras que recorren la muestra en la dirección del flujo plástico del material, producto del proceso de fabricación previo del material. Mientras que en el material laminado en frío (Figuras 2 y 3)

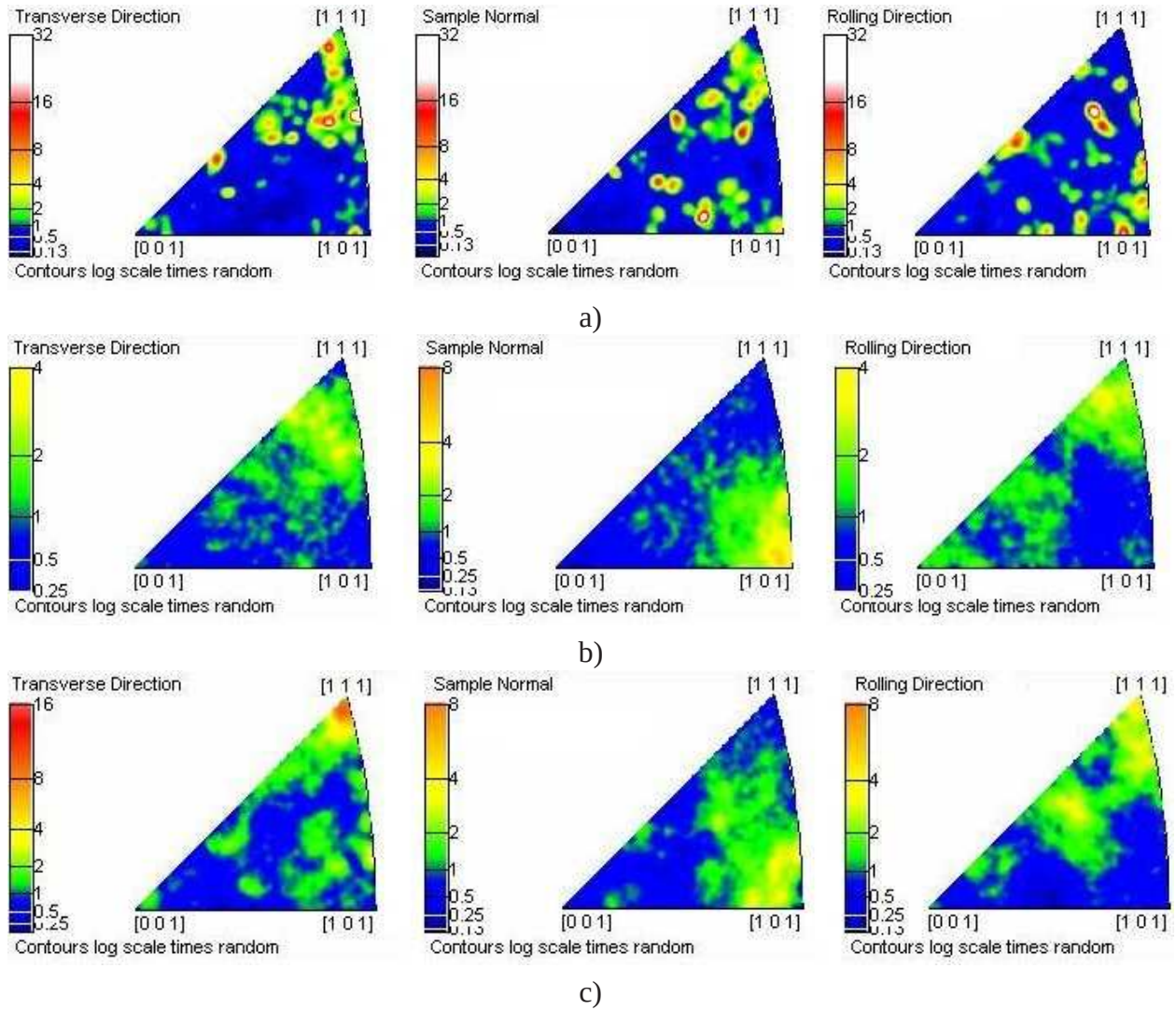


Figura 8: Figuras de Polo Inversas del acero AISI 304, obtenidas por EBSD a) estado de entrega, b) laminado en frío 18.3%, c) laminado en frío 33.7%

se observa una microestructura similar pero con gran cantidad de bandas de deformación, de mayor intensidad que las visualizadas en la condición anterior, se visualizan granos alargados y deformados, además de la presencia de gran cantidad de maclas de deformación dentro de los granos producto de la laminación en frío [1].

El comportamiento de la dureza es similar en la mitad del espesor, medida en los planos longitudinal y transversal; mientras que estos valores son ligeramente menores a la dureza medida en la superficie de laminación. Esta diferencia se debe probablemente, a que el proceso de laminación genera mayor deformación plástica de los granos en la superficie de contacto con los rodillos de laminación, debido a las fuerzas de fricción y a la adherencia que ocurre en el proceso. Esta ligera diferencia se observó en todas las condiciones de estudio. El incremento de la dureza en las diferentes condiciones de deformación, se debe al endurecimiento por deformación generado por la laminación, la cual incrementa la densidad de dislocaciones [2].

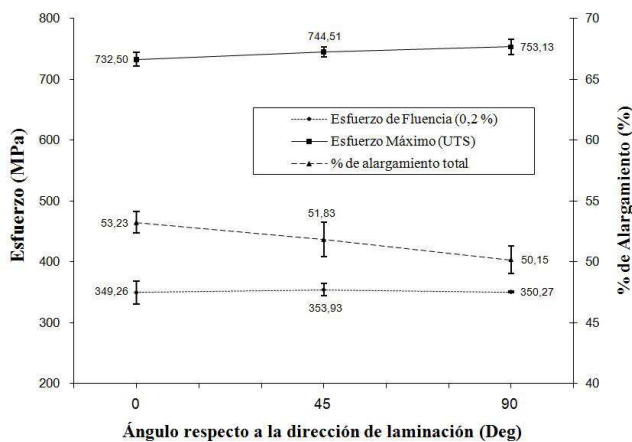


Figura 9: Comportamiento de las propiedades mecánicas AISI 304 en estado de entrega

Las Figuras 9, 10 y 11 recopila el comportamiento mecánico del acero inoxidable austenítico AISI 304 indicando las propiedades mecánicas obtenidas y su desviación o error. Se observa que para las muestras en estado de entrega (Figura 9), el esfuerzo de fluencia se mantiene constante con la orientación, mientras que el esfuerzo máximo se incrementa ligeramente desde la orientación

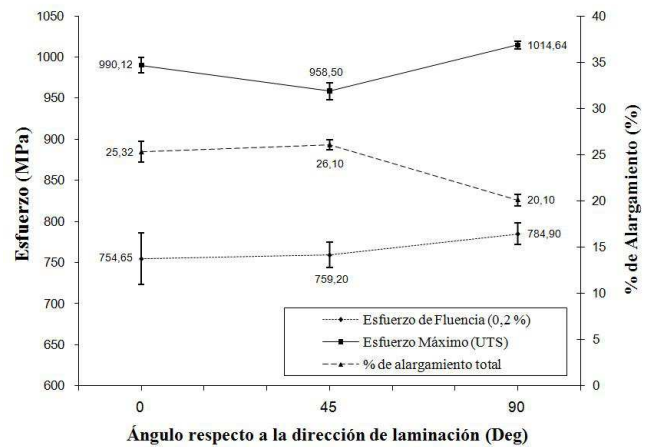


Figura 10: Comportamiento de las propiedades mecánicas AISI 304 en laminado en frío 18,3 %

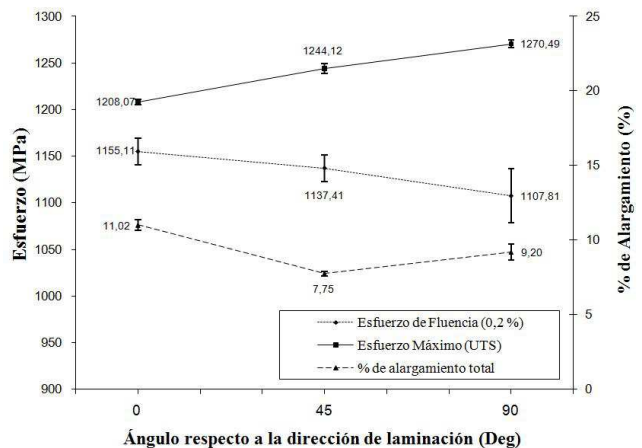


Figura 11: Comportamiento de las propiedades mecánicas AISI 304 en laminado en frío 33,7 %

longitudinal (0°) a la orientación transversal (90°), y el porcentaje de alargamiento disminuye ligeramente. Este comportamiento indica una ligera anisotropía del material en estado de entrega, con mayor resistencia y menor ductilidad en la dirección transversal al sentido de laminación. En las condiciones de laminado en frío en 18,3 % (Figura 10) y en 33,7 % (Figura 11).

En las figuras de polo inversas (Figura 4a) no se observa una orientación predominante en ninguna de las familias de direcciones cristalográficas de acuerdo a las direcciones del sistema externo, por lo que se puede decir, que la textura de fibra es aleatoria para cada dirección, esto explica la baja anisotropía evidenciada en condición de entrega.

En las figuras de polo inversas que se muestran

en la Figura 8 a) se observa una textura de fibra predominante en $\langle 101 \rangle // ND$ (dirección cristalográfica $\langle 101 \rangle$ alineada o paralela a la dirección normal al sentido de laminación), mientras que se observa una textura de fibra mixta en $\langle 111 \rangle // RD$ y en $\langle 001 \rangle // RD$, con menor intensidad en esta última. También se tiene una textura de fibra que evoluciona a $\langle 111 \rangle // TD$, aunque no observa que ésta sea una textura de fibra predominante aún. La componente $\langle 111 \rangle$ produce una mayor resistencia a la tracción que la componente $\langle 100 \rangle$, en metales con estructura FCC [3]. El acero inoxidable austenítico AISI 304, posee una estructura austenítica FCC, por lo que al alinearse la componente que evoluciona a $\langle 111 \rangle$ en la dirección perpendicular al sentido de laminación (transversal), le brinda mayor resistencia a tensión a esta dirección, mientras que la textura de fibra mixta en $\langle 111 \rangle // RD$ y en $\langle 001 \rangle // RD$ hace que la resistencia del material dependa de las contribuciones de estas orientaciones, encontrándose una menor resistencia en RD. Puede atribuirse entonces, la anisotropía encontrada en las propiedades mecánicas, a la diferencia de textura de fibra encontrada en direcciones longitudinal (RD) y transversal (TD), siendo mayor la resistencia en TD.

En las figuras de polo inversas (Figura 8 c) se observa una textura de fibra predominante y de gran intensidad en $\langle 111 \rangle // TD$, y en $\langle 111 \rangle // RD$, pero de menor intensidad en esta última, evidenciando una evolución de la textura de fibra en la dirección de laminación (RD) y en la dirección transversal al sentido de laminación (TD), con respecto a la deformación previa (Figura 8 b). La evolución de la textura ha sido congruente con el comportamiento en las propiedades mecánicas. Para esta condición se registró el mayor valor de resistencia máxima en la dirección transversal (TD), precisamente donde se tiene alineada una textura de fibra predominante y de gran intensidad en $\langle 111 \rangle$, mientras que la menor resistencia se ha encontrado en RD.

6. Conclusiones

Se obtuvo una diferencia máxima en la resistencia a tracción, para el material laminado en frío en 18,3 %, entre la orientación diagonal y la orientación transversal del 5,86 % (56,14 MPa). Se obtuvo una diferencia máxima en la resistencia a tracción, para el material laminado en frío en 33,7 %, entre la orientación longitudinal y la orientación transversal del 5,16 % (62,42 MPa). Para el acero inoxidable austenítico AISI 304, la orientación transversal al sentido de laminación ofrece la mayor resistencia a tracción, el mayor módulo de elasticidad y el menor porcentaje de reducción de área, mientras que la orientación longitudinal es la que ofrece la menor resistencia, menor módulo de elasticidad y el mayor porcentaje de reducción de área.

La textura cristalográfica del material laminado en frío reveló, una textura de fibra predominante en $\langle 111 \rangle // TD$, y en $\langle 111 \rangle // RD$, siendo de mayor intensidad en la dirección transversal (TD), a las cuales puede atribuirse, la anisotropía obtenida en las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304 laminado en frío.

Agradecimientos

Los agradecimientos son dirigidos al Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología FONACIT, por subvencionar la pasantía de investigación, mediante subvención N° 69050, y al director y a todo el personal del Instituto de Tecnología de Materiales ITM de la Universidad Politécnica de Valencia, España, por brindar apoyo en la evaluación de la textura cristalográfica.

Referencias

- [1] Shackelford J., (2005): "Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros". Pearson Educación S.A., 6ta edición, Madrid, ISBN 8420544515, pp. 398-400.
- [2] Hosford W. F. y Caddell R. M (1983): "Metal Forming: Mechanics and Metallurgy". Prentice Hall, New York, pp.: 263-271.
- [3] Kocks, U. F., Tomé, C. N., y Wenk, H. -R., (1998): "Texture and anisotropy: preferred orientations in polycrystal and their effect on materials properties", Cambridge University Press, ISBN 0521465168, pp. 12-30, 46-90, 167-176, 181-200.

- [4] Hutchinson W. B., Ushioda K, y Runnsjo G., (1985): "Anisotropy of tensile behaviour in a duplex stainless steel sheet". *Material Science and technology*. Volume 1, pp. 728-731.
- [5] Hill R. (1989): "The Mathematical Theory of Plasticity". Oxford University Press, New York, pp.: 317-325.
- [6] Song J. L. y Bate P. S. (1997): "Plastic anisotropy in a superplastic duplex stainless steel". *Acta Metallurgica*, Volumen 45, No. 7, pp. 2747-2757.
- [7] Mateo A., Llanes L., Akdut N. y Stolarz J., (2003): "Anisotropy effects on the fatigue behavior of rolled duplex stainless steels". *International Journal of Fatigue*, Volume 25, No. 6, pp. 481-488.
- [8] ASTM E3-01, (2001): "Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens", American Society of Testing and Materials, ASTM International, PA. USA.
- [9] ASTM E18-05, (2005): "Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials", American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA. USA.
- [10] ASTM E8M-06, (2006): "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", American Society of Testing and Materials, ASTM International, PA. USA.